



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## DYNAMICKÉ VLASTNOSTI LADĚNÉ ODBOČKY

DYNAMIC PROPERTIES OF TUNED BRANCH

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ ČEPL

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR HABÁN, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Ondřej Čepl**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Dynamické vlastnosti laděné odbočky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití laděné odbočky nebo Helmholtzova rezonátoru pro snížení tlakových pulsací je v technické praxi využíváno výjimečně. V bakalářské práci bude proveden výpočet přenosu pro jeden případ ladění odbočky. Bude navržen experiment a bude provedeno vyhodnocení experimentu.

### Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše.  
Navržení experimentu.  
Vyhodnocení měření dat.  
Stanovení přenosu laděné odbočky.

### Seznam doporučené literatury:

BRDIČKA, M., SAMEK, L., SOPKO, B.: Mechanika kontinua. Akademia, Praha 2000, ISBN 80-20-0772-5

POCHYLÝ, F.: Dynamika tekutinových systémů: Určeno pro posl. fak. strojní. 1. vyd. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0139-7

HABÁN, V.: Tlumení tlakových a průtokových pulzací: teze disertační práce. V Brně: Vysoké učení technické, 2001. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. ISBN 80-214-1905-9.

SMOLÍK, A.: Kmitání stlačitelné tekutiny ve válcové oblasti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství, 2016. 70 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Hlavním cílem této práce je experimentální stanovení přenosu laděné odbočky. V první části jsou popsány základní poznatky z oblasti digitálního zpracování signálu a tlumení hluku v potrubí. Zvláštní důraz je kladen na Fourierovu transformaci. Druhá část se zabývá experimentálním měřením útlumu laděné odbočky pro různé délky rezonátoru. K vyhodnocení naměřených dat je použita Fourierova transformace se splněním podmínky koherence. Na konci této práce je grafické zobrazení frekvence naladění v závislosti na délce laděné odbočky pro sedm různých délek a porovnání s teoretickými hodnotami.

## **Summary**

The main part of the thesis is experimental determination of transmission in side-branch resonator. In first part are described basics of digital signal processing and sound damping in piping systems. A special attention is payed to Fourier transform. The second part deals with experimental measurement of damping in a side-branch resonator for several lengths of the resonator. The collected data were analyzed using Fourier transform with a fulfilled coherence condition. At the end of this section are shown graphs, which describe tuning frequency dependence of side-branch resonator's length. There are seven different lengths. The thesis contains comparison of theoretical and measured tuning frequencies.

## **Klíčová slova**

tlumení hluku v potrubí, Helmholtzův rezonátor, laděná odbočka, Fourierova transformace

## **Keywords**

sound damping in pipes, Helmholtz resonator, side-branch resonator, Fourier transform

ČEPL, O. *Dynamické vlastnosti laděné odbočky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 67 s. Vedoucí doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.



Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Dynamické vlastnosti laděné odbočky* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Habána, Ph.D. s použitím materiálu uvedeným v seznamu použitých zdrojů.

23. května 2019

.....  
Ondřej Čepl





Děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D., za vstřícnost a ochotu, poskytnuté rady a čas strávený na konzultacích, které měly vždy pozitivní atmosféru. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Hudci za jeho čas a trpělivost při provádění experimentu. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým blízkým přátelům, přítelkyni a rodině za důvěru a trpělivost při psaní této práce.

Ondřej Čepl

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Akustické vlnění</b>	<b>12</b>
2.1	Základní pojmy . . . . .	12
2.1.1	Vlnění v pružném prostředí . . . . .	12
2.1.2	Akustický tlak . . . . .	13
2.1.3	Frekvence a perioda . . . . .	13
2.1.4	Úhlová frekvence . . . . .	14
2.1.5	Vlnění . . . . .	14
2.1.6	Akustický výkon a intenzita . . . . .	15
2.1.7	Hladiny akustických veličin . . . . .	15
2.1.8	Konvoluce a dekonvoluce . . . . .	16
2.2	Spektrální analýza . . . . .	17
2.2.1	Periodické a neperiodické signály . . . . .	18
2.2.2	Diskrétní a spojitý signál . . . . .	19
2.2.3	Spektrum harmonického signálu . . . . .	20
2.2.4	Čárové (diskrétní) spektrum . . . . .	21
2.2.5	Fourierova transformace . . . . .	21
2.2.6	Diskrétní Fourierova transformace . . . . .	23
2.2.7	Rychlá Fourierova transformace . . . . .	24
2.3	Hluk a vibrace . . . . .	25
2.3.1	Útlum zvuku vlivem absorpce ve vzduchu . . . . .	26
2.3.2	Kontakt vlny s překážkou . . . . .	27
2.3.3	Přístupy potlačování přenosu hluku . . . . .	27
2.3.4	Rozdělení . . . . .	28
2.3.5	Snižování hluku v potrubních systémech – zvuk v trubici . . . . .	28
2.3.6	Helmholtzův rezonátor . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Návrh experimentu</b>	<b>32</b>
3.1	Návrh a popis měřicí tratě . . . . .	32
3.2	Způsob buzení soustavy a použité přístroje . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Metoda zpracování dat</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky měření a diskuze</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>47</b>
	Seznam použitých zdrojů	48
	Seznam použitých symbolů a zkratk	51
	Seznam příloh	51

# 1. Úvod

Problematika snižování hluku je v poslední době stále důležitější, protože vystavení intenzivnímu nebo dlouho trvajícím zvuku má negativní vliv na lidské zdraví a může mít i trvalé následky – poškození sluchového orgánu, pískání v uších, poruchy spánku atd.

Zvuk se většinou šíří od konkrétního místa do okolí, proto je výhodné ho utlumit přímo u zdroje. Častým způsobem je úprava konstrukce za použití specializovaných prvků – tlumičů hluku. V některých případech jsou však konstrukční úpravy ke snížení vyzařovaného zvuku nemožné nebo ekonomicky nevýhodné, proto je třeba ochránit lidský sluch jiným způsobem.

Tlumení zvuku v potrubí se nejčastěji realizuje pomocí absorpčních širokopásmových tlumičů, které jsou obvykle z pórovitého materiálu a vkládají se přímo do potrubí. Méně častým způsobem tlumení jsou konstrukce založené na principu Helmholtzova rezonátoru. Pro správné fungování těchto tlumičů je důležité umístění rezonátoru do kmitny tlaku. Na rozdíl od absorpčních tlumičů jsou použitelné pouze pro úzké kmitočtové pásmo, v extrémním případě jen pro jednu konkrétní frekvenci.

Laděná odbočka je zvláštním druhem Helmholtzova rezonátoru, která má jinou konstrukci, než je obvyklé. Většinou je chápána jako trubice, která se používá k zatlumení amplitudy na konkrétní frekvenci a má délku  $1/4$  vlnové délky příslušné frekvence.

Na začátku práce jsou uvedeny teoretické základy v oblasti zpracování signálu a tlumení hluku. Hlavním cílem této práce je návrh experimentu s použitím laděné odbočky a stanovení jejího přenosu. Přenos je vhodné znázornit v grafické podobě. Nedílnou součástí práce je zpracování naměřených dat za pomoci Fourierovy transformace v programu *Matlab*.

## 2. Akustické vlnění

### 2.1. Základní pojmy

Kapitola 2.1 popisuje pojmy a skutečnosti potřebné k pochopení následujících kapitol. Celá kapitola čerpá z literatury [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

#### 2.1.1. Vlnění v pružném prostředí

Zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí (např. vzduchu), které je možné slyšet pouhým uchem. Pohybuje se ve frekvencích od 16 do 20 000 Hz. Zvuk se šíří konstantní rychlostí (tzv. rychlostí zvuku) a ta je závislá pouze na daném prostředí. Rychlost šíření zvukové vlny v plynech je závislá hlavně na termodynamické teplotě prostředí a je zcela nezávislá na frekvenci vlnění [1]. Proto když na nás mluví muž, jehož hlas má nízkou frekvenci, a žena s vysokou frekvencí hlasu, zvukové vlny od obou lidí uslyšíme ve stejnou chvíli. Závislost lze popsat pomocí tuhosti prostředí – rychlost zvuku je závislá na stlačitelnosti média. Vzduch je lehce stlačitelný, proto se zde vlny šíří relativně pomalu. Pokud by existovalo zcela nestlačitelné prostředí, byla by v něm rychlost zvuku nekonečně velká. Takové médium se však v přírodě nevyskytuje [8].

Obecný tvar rovnice udává závislost *rychlosti zvuku*  $c$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] v pružném prostředí (plynném, kapalném i pevném) na *modulu objemové stlačitelnosti*  $K$  [ $Pa$ ] a *hustotě prostředí*  $\rho$  [ $kg \cdot m^{-3}$ ].

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.1)$$

$c$	rychlost zvuku [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$K$	modul objemové stlačitelnosti [ $Pa$ ]
$\rho$	hustota prostředí [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Za určitých předpokladů<sup>1</sup> je možné tento vztah pro plynné prostředí upravit pomocí stavové rovnice na tvar:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa p_b}{\rho}}. \quad (2.2)$$

$\kappa$	Poissonova konstanta [–]
$p_b$	tlak plynu [ $Pa$ ]

Pomocí dalších úprav je získán vztah (2.3) pro šíření podélných vln ve vzduchu, kde je vidět přímá závislost na teplotě.

$$c = \sqrt{\kappa r T} \quad (2.3)$$

$r$	měrná plynová konstanta [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$T$	termodynamická teplota vzduchu [ $K$ ]

---

<sup>1</sup>Při šíření je děj považován za adiabatický ( $K = \kappa \cdot p_b$ ) – změna akustického tlaku a tím i lokální teploty jsou při průchodu vlny tak rychlé, že lze místa s vyšším akustickým tlakem brát jako izolovaná od míst s nižším tlakem. Při další úpravě rovnice je akustický tlak považován z hlediska úrovně pozorování za nepodstatný v porovnání s barometrickým [1].

Ze známých konstant  $\kappa$  a  $r$  pro vzduch je získán finální tvar rovnice

$$c = 331,6 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273,15}}. \quad (2.4)$$

$t$             teplota vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Z poslední rovnice plyne, že rychlost šíření zvukových vln ve vzduchu je závislá pouze na teplotě média. Příklady rychlosti zvuku v závislosti na prostředí při běžných teplotách:

- ve vzduchu:  $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- ve vodě:  $1440 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- v oceli:  $5750 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Lze vidět, že v plynném prostředí se zvuk šíří podstatně pomaleji než v kapalném a pevném prostředí.

### 2.1.2. Akustický tlak

Vlnění je možné dělit podle směru šíření na podélné a příčné. V kapalinách a plynech se šíří pouze podélné vlnění. „Částice se jednosměrně nepohybují ve směru šíření, nýbrž kmitají kolem svých rovnovážných poloh.“ [1] Při šíření zvuku se nepohybují částice prostředí z místa A do místa B, ale přenáší se pouze energie prostřednictvím akustických vln. Vznikají místa, která se vyznačují větší či menší koncentrací částic prostředí. Díky této skutečnosti lze najít místa s rozdílným celkovým tlakem (místa lokálního přetlaku a podtlaku). Celkový tlak osciluje s šířící se vlnou kolem statické hodnoty tlaku. Akustický tlak je chápán jako odchylka od statického tlaku. Hodnotu celkového tlaku lze spočítat jako součet statického a akustického tlaku, viz obr. 2.1.

$$p_c = p_b + p(t) \quad (2.5)$$

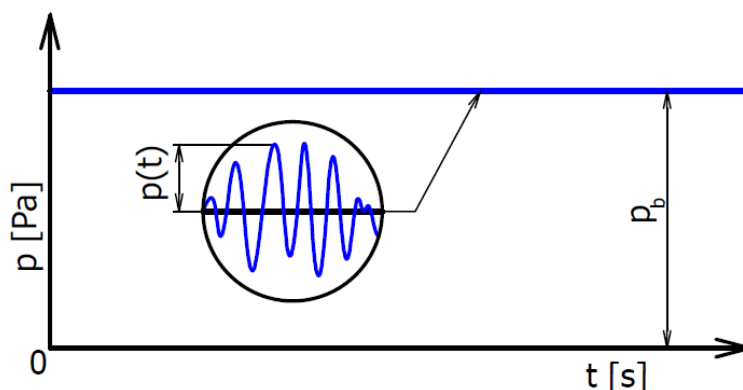
$p_c$             celkový tlak [ $\text{Pa}$ ]  
 $p(t)$         akustický tlak v závislosti na čase [ $\text{Pa}$ ]  
 $p_b$             statický tlak [ $\text{Pa}$ ]

Ačkoli je změna tlaku vlivem vlnění řádově menší než barometrický tlak, lidské ucho dokáže tyto změny zaznamenat již při velmi nízkých hodnotách. Hodnota barometrického tlaku je přibližně 101 kPa, člověk však dokáže zaznamenat změnu tlaku od  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Tato hodnota je považována za práh slyšitelnosti při frekvenci 1 kHz pro normálně slyšícího člověka.

### 2.1.3. Frekvence a perioda

Představme si závaží zavěšené na ideální pružině, které je vychýleno z rovnovážné polohy do vzdálenosti A. Tato vzdálenost představuje amplitudu, což je maximální vzdálenost od rovnovážné polohy. *Perioda* –  $T$  [s] je doba, za kterou vykoná částice (závaží) jeden kmit, tj. projde přes rovnovážnou polohu až se maximálně vychýlí na opačnou stranu a

## 2.1. ZÁKLADNÍ POJMY



Obrázek 2.1: Průběh tlaku [1], upraveno.

pak se opět přes rovnovážnou polohu vrátí do maximální spodní polohy. Při šíření vlnění se jedná o kmitání tlaku – tzv. *pulzace*. Princip je podobný jako u kmitání mechanického závaží, ale místo pohybu tělesa se pohybují částice vzduchu. *Kmitočet* neboli *frekvence* –  $f$  [Hz] je převrácená hodnota periody. Značí, kolik vykoná těleso kmitů za jednu vteřinu. Frekvence a perioda jsou svázány vztahem:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.6)$$

$f$       frekvence [Hz]  
 $T$       perioda [s]

### 2.1.4. Úhlová frekvence

Úhlová frekvence popisuje, jak rychle se mění poloha kmitající částice v závislosti na čase. Je to skalární veličina a používá se pro periodicky se opakující děje. Značí se  $\omega$  s jednotkou  $[s^{-1}]$ . Na druhou stranu *úhlová rychlost* (která se často zaměňuje s úhlovou frekvencí) popisuje otáčivý pohyb tělesa. Vyjadřuje změnu úhlu za jednotku času  $[rad/s]$ . Jelikož zvukové vlny nejsou spojeny s pohybem po kružnici, je používána úhlová frekvence. Frekvence a úhlová frekvence mají v soustavě SI stejnou jednotku  $[s^{-1}]$ , ale každá vyjadřuje něco jiného, proto se pro frekvenci zavádí jednotka [Hz]. Vztah mezi těmito veličinami je následující:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}. \quad (2.7)$$

$\omega$       úhlová frekvence  $[s^{-1}]$

### 2.1.5. Vlnění

Vlnění vzniká v důsledku kmitání povrchů těles nebo nestacionárním prouděním tekutého prostředí. V prvním případě se mění mechanická energie kmitajícího tělesa na akustickou energii prostředí, která se dále šíří ve formě zvukových vln. Tento případ je možné pozorovat u hudebních nástrojů. Když se předá struně energie, lze zpočátku slyšet velmi silnou zvukovou odezvu. Postupně však intenzita tohoto zvuku slábne, až struna přestane kmitat úplně. Při tomto jevu je pozorována přeměna mechanické energie struny na akustickou energii, tj. vznik a šíření zvukových vln.

V druhém případě vzniká zvuk v místě neustáleného proudění tekutiny (plynu, kapaliny) nebo tam, kde dochází k výrazným změnám tlaku. To lze pozorovat například u výfuku spalovacích motorů. Pokud přidáme plyn, je možné slyšet pro každé auto jeho charakteristický zvuk, který je způsoben nestacionárním prouděním v oblasti výfuku.

Akustické vlnění popisuje veličina *vlnová délka* –  $\lambda$  [m], jenž označuje vzdálenost dvou sousedních bodů, které mají stejnou výchylku a stejnou fázi. „Obecně je to vzdálenost mezi nejbližšími vlnoplochami se stejnými akustickými stavy kmitajících částic.“ [2]. Lze ji popsat pomocí frekvence a periody vztahem

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.8)$$

c rychlost šíření zvuku v daném prostředí [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
f frekvence [Hz]

### 2.1.6. Akustický výkon a intenzita

„Množství akustické energie, které prochází za jednotku času myšlenou prostorovou plochou, nazýváme akustickým výkonem  $P$  [W].“ [2] Akustický výkon může také značit množství energie, které zdroj přenese do prostředí za jednotku času. Na rozdíl od akustického tlaku je nezávislý na vnějších faktorech, jedná se o absolutní parametr. Používá se např. na hodnocení zdrojů akustického vlnění, neboť vyzářená energie je nezávislá na vzdálenosti a směru od zdroje [3].

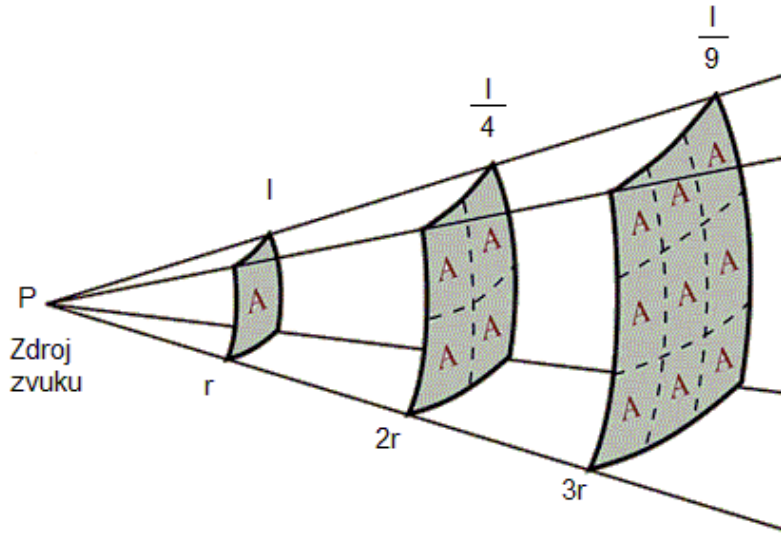
Vztáhne-li se energie na jednotku plochy za jednotku času, hovoří se o *měrném akustickém výkonu*. Měrný akustický výkon je větší, čím silnější je akustický zdroj, protože se do prostoru uvolní více energie. Rostoucí vzdálenost od zdroje zvuku tuto veličinu snižuje.

Jelikož je výkon zvukového vlnění závislý na akustickém tlaku, jeho hodnota není většinou konstantní a s časem se mění. Proto existuje veličina zvaná *intenzita zvuku*  $I$  [ $W \cdot m^{-2}$ ], která vyjadřuje střední hodnotu měrného akustického výkonu. Jak lze z jednotek intenzity odvodit, jedná se o akustický výkon vztažený na jednotkovou plochu. Na rozdíl od akustického tlaku má intenzita charakter vektoru, proto záleží na tom, jaký úhel svírá normála myšlené jednotkové plochy se směrem šíření vlny. Akustická intenzita je závislá nejen na tlaku, ale i na výšce tónu (frekvenci vlnění). V technické praxi je zjišťování intenzity velmi náročné, proto se běžně měří akustický tlak, který se při použití předpokladu rovinné (popř. kulové) vlny přepočte na akustickou intenzitu. Intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti, protože je rozprostřena do stále větší plochy, viz obr 2.2.

### 2.1.7. Hladiny akustických veličin

Lidské ucho dokáže vnímat různě velké změny tlaku. Jeho vnímání není lineární, ale přibližně úměrné logaritmické závislosti, jak praví Weber-Fechnerův zákon. Z důvodu velkého rozsahu hodnot byly zavedeny veličiny, které se ukázaly jako praktičtější pro popis akustických parametrů. Hladiny, které jsou dále zmíněny, vznikly na základě citlivosti lidského ucha na změny akustického tlaku. Pojem *hladina* značí, že se jedná o stupnici logaritmickou – nelineární. S vjemem člověka souvisí dvě hodnoty. Nazývají se spodní a horní prahová hodnota slyšitelnosti. Pro normálně slyšícího člověka se jedná o změnu tlaku (popř. akustického výkonu), kterou ještě dokáže vnímat a prahovou hodnotu, u které

## 2.1. ZÁKLADNÍ POJMY



Obrázek 2.2: Intenzita zvuku v závislosti na vzdálenosti [9], upraveno.

začíná pociťovat bolest sluchového orgánu. Stejně jako je definován akustický tlak, výkon a intenzita, lze definovat hladiny jednotlivých veličin.

$$L = \log \left( \frac{A}{A_0} \right) = \log \left( \frac{\text{hodnota porovnávané veličiny}}{\text{referenční hodnota}} \right) \quad (2.9)$$

Jako referenční hodnota se používá spodní prahová hodnota slyšení ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa;  $10^{-12}$  W;  $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Jednotkou hladiny je *bel* [B] nebo častěji deset krát menší [dB] pro vhodnější popis měřených veličin. Jednotlivé hladiny nelze zaměňovat, protože každá charakterizuje něco jiného.

V praxi je obtížné měřit přímo hladiny akustických veličin. Většina akustických přístrojů je schopná měřit efektivní hodnotu akustického tlaku nebo přímo akustický tlak. Mezi tlakem, intenzitou a jednotlivými hladinami platí jednoduché vztahy, proto není nutné provádět obtížná měření a jednotlivé hladiny veličin se pouze dopočítají [3].

### 2.1.8. Konvoluce a dekonvoluce

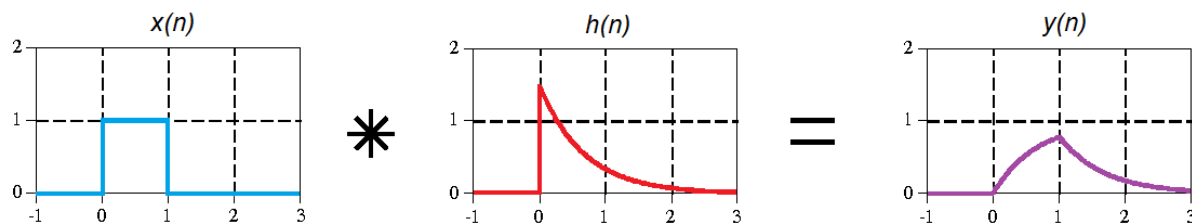
Konvoluce je matematická operace, která se často využívá při práci se signály. V DSP (digital signal processing) se používá k určení odezvy lineárních systémů na vstupní signál. Necht soustava  $H$  má diskrétní odezvu systému  $h(n)$ .  $X(n)$  je nějaký signál, pro názornost si lze představit jednu periodu sinusoidu. Konvoluce udává, co se stane se signálem  $x(n)$ , projde-li soustavou  $H$  [7], [4]. Lze předpovědět, jak se změní různé signály po průchodu soustavou  $H$ . Pro lineární diskrétní konvoluci platí vztah

$$y(n) = \sum_{m=0}^n x(m) \cdot h(n-m) = x(n) * h(n). \quad (2.10)$$

$y(n)$      odezva systému na vstupní signál  
 $x(n)$      vstupní signál  
 $h(n)$      odezva systému  $H$



Konvoluci lze místo na signál a soustavu aplikovat na dva signály. Příklad konvoluce dvou spojitých signálů lze vidět na obrázku 2.3. Této skutečnosti se využívá při pou-



Obrázek 2.3: Grafické znázornění konvoluce dvou spojitých signálů [10], upraveno.

žití různých filtrů a váhovacích oken k odstranění šumu ze záznamu nebo pro zlepšení vlastností signálu, který byl zkrácen [6]. Inverzním nástrojem je *dekonvoluce*, pomocí níž je možné zjistit vlastnosti systému pouze na základě vstupního a výstupního signálu. Obě operace lze aplikovat pouze na systémy, které mají lineární charakter.

## 2.2. Spektrální analýza

Nejdříve je vhodné vysvětlit pojem spektrum. Jedná se o soubor hodnot sledované veličiny (akustického tlaku, napětí, ...) v závislosti na kmitočtu [1]. Při sledování nějakého signálu je možné použít různé způsoby popisu. Existují dva základní druhy popisu signálů. První, se kterým se lze často setkat, je v originální oblasti. Jako příklad je možné uvést výchylku elektrického napětí v závislosti na čase – obr. 2.4 (nahore).

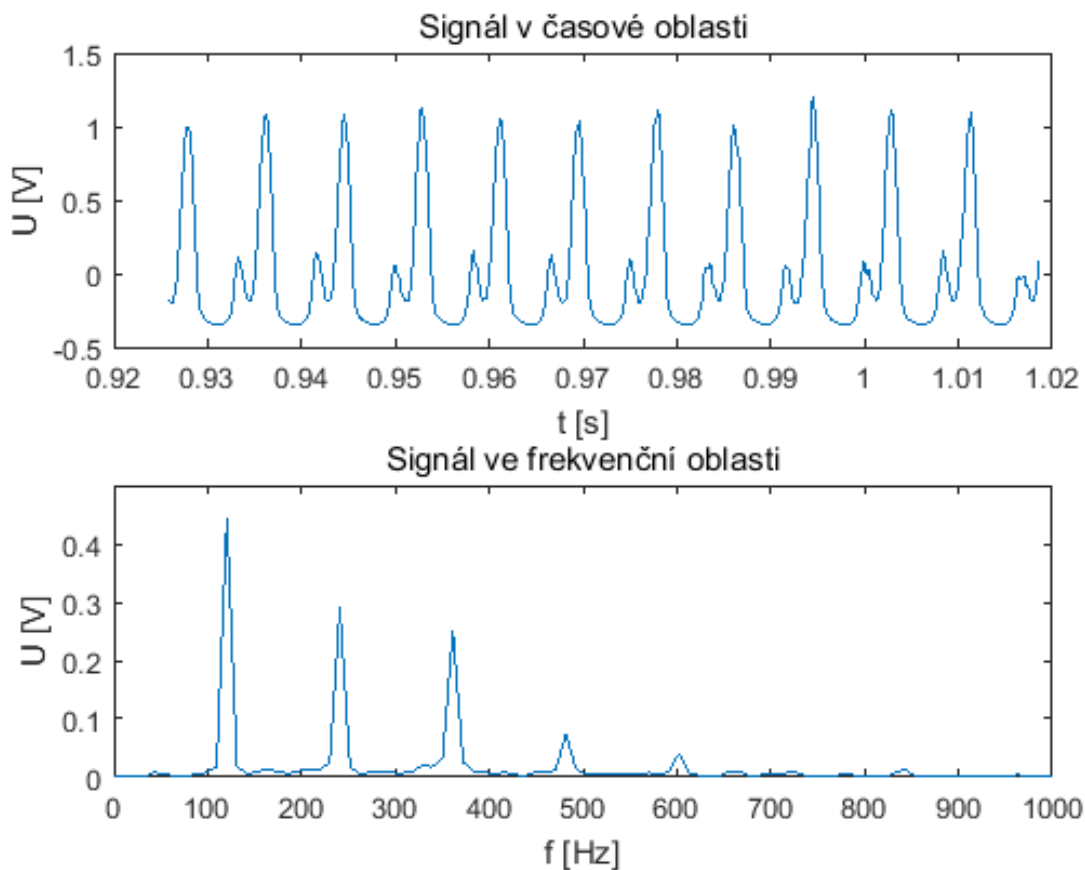
Druhým způsobem je zobrazení ve spektrální oblasti. Zde by se u použitého příkladu jednalo o zobrazení amplitudy elektrického napětí v závislosti na kmitočtu – obr. 2.4 (dole). Spektrum určuje, z jakých vln lze složit pozorovaný průběh signálu. Oba průběhy jsou důležité a každý udává jiný pohled na daný signál – liší se zejména jejich fyzikálním významem a interpretací, viz obr. 2.5 .

Často je vhodné kombinovat oba pohledy, i když jsou si kvalitativně rovnocenné. Obecně lze říci, že cílem spektrální analýzy je zjistit složky ve spektrální oblasti. Znalost spektrálního popisu umožňuje vysvětlit řadu jevů, které nelze jiným způsobem popsat, nebo by to bylo velmi obtížné [7].

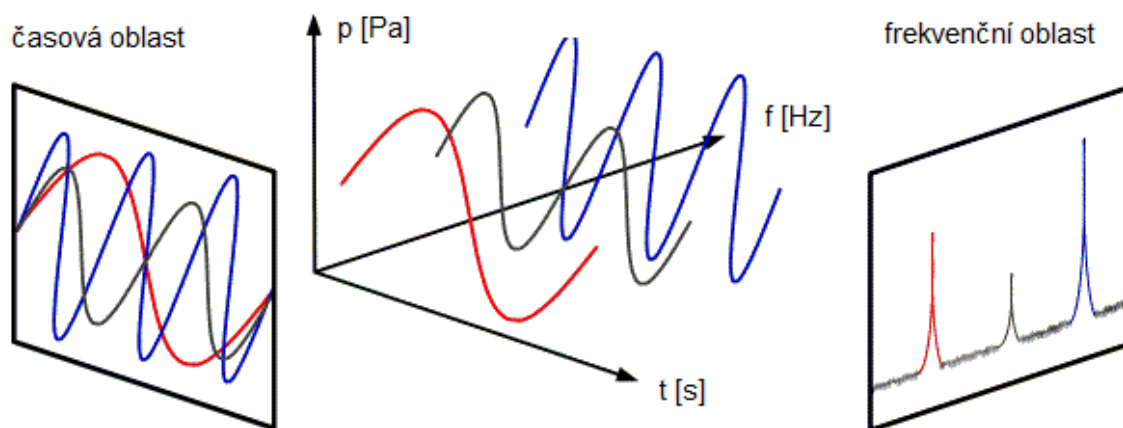
Když slyšíme nějaký zvuk, většinou se jedná o kombinaci vln o různých frekvencích, amplitudách a fázových posunech. Akustické vlny se mohou různě odrážet, ohýbat, dělit, procházet materiálem nebo být pohlcovány. Proto vznikají kombinace vln, které si lze jen těžce představit. Je možné se setkat se zvuky, které se skládají pouze z vln o jedné frekvenci, přesto mají složitý časový průběh. Tyto signály se v přírodě běžně nevyskytují. Frekvence je velice důležitá charakteristika zvukového signálu, proto se frekvenční spektrum považuje za základní charakteristiku zvukového signálu. Spektrum může být dvojího druhu – čárové (diskrétní) a spojité. Spektra je možné rozdělit také podle toho, zda se signál periodicky opakuje nebo nikoli.

Kapitola 2.2 popisuje různé druhy signálů a způsob, jakým lze signály zpracovat. Vychází z literatury [1], [7], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26].

## 2.2. SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA



Obrázek 2.4: Signál v časové a frekvenční oblasti.



Obrázek 2.5: Pohled na originální a spektrální oblast [11].

### 2.2.1. Periodické a neperiodické signály

Periodické signály jsou takové, pro které platí, že se jejich funkční hodnoty opakují v určitých pravidelných časových intervalech, které nazýváme *opakovací periodou*  $T_0$  [s]. Matematický zápis periodického signálu pro výchylku akustického tlaku je možné zapsat následovně:

$$p(t) = p(t + k \cdot T_0), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.11)$$

$T_0$	opakovací perioda
$p(t)$	hodnota výchylky pozorované veličiny (akustického tlaku)

Dle matematických zásad by měl být signál definovaný na časovém intervalu  $t \in (-\infty; +\infty)$ . Při práci s reálnými signály je toto kritérium nedosažitelné, proto se podmínka redukuje – signály lze považovat za periodické, pokud po dobu pozorování obsahují dostatečný počet cyklů. V některých odborných publikacích se lze setkat s označením periodického signálu ve tvaru *pulz* či *pulzní průběh*. Neperiodické signály se nikdy neopakují (například bílý šum), neplatí pro ně rovnice (2.11). Spektrum takového signálu nebude diskrétní jako u periodického signálu, naopak se bude skládat z nekonečného množství různých kmitočtů, v extrémním případě bude spektrum spojitě [7], [18].

### 2.2.2. Diskrétní a spojitý signál

Pro práci se signály je nutné vzít do úvahy, že reálné průběhy jsou spojitě křivky (např. průběh napětí či akustického tlaku). Počítač, ve kterém je signál zpracováván, dokáže pracovat pouze s diskrétními hodnotami. Pokud je měřena konkrétní veličina analogovým přístrojem, v jakýkoli časový okamžik je možné vidět, že přístroj ukazuje určitou výchylku (může být i nulová). Jinak řečeno, vždy je naměřena nějaká hodnota, ať je na přístroj nahlíženo v kterýkoli časový okamžik [7].

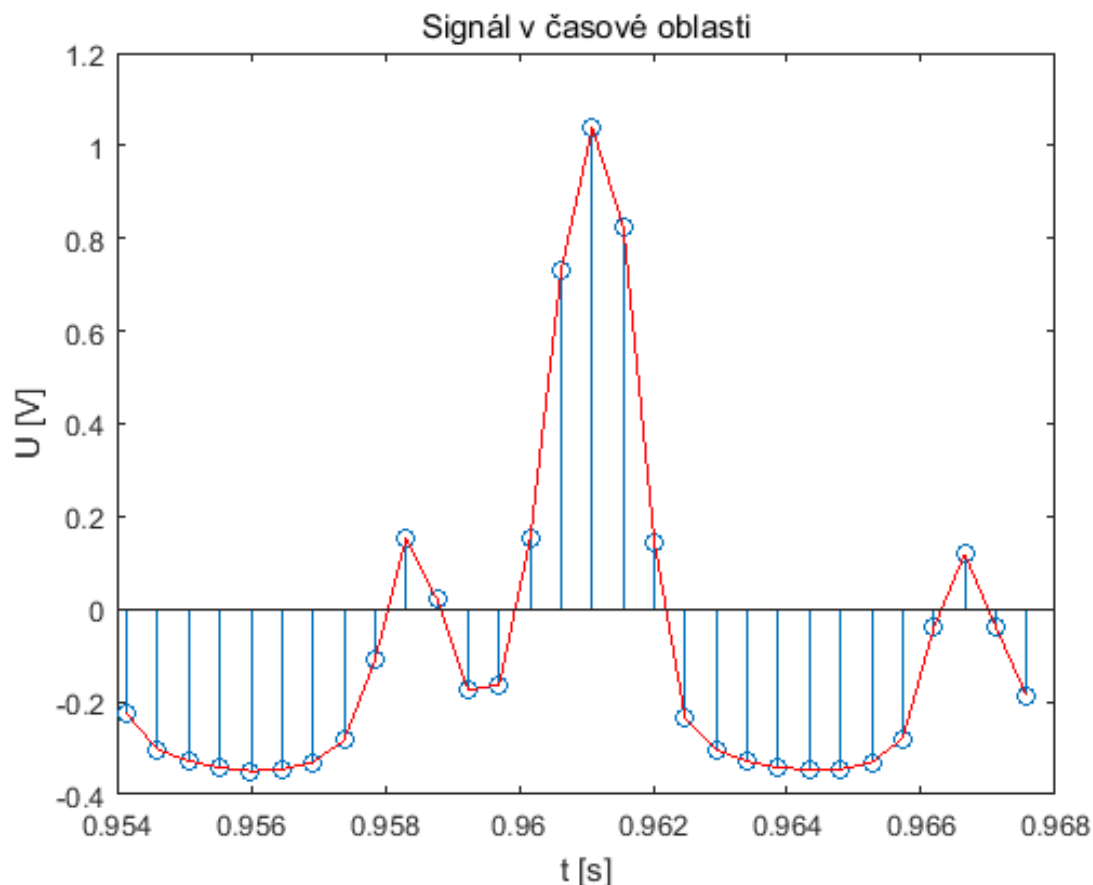
Pro vybraný konečný časový interval, ve kterém je sledován průběh napětí v závislosti na čase, jsou zapsány funkční hodnoty po předem daném ekvidistantním časovém kroku a proloženy po částech úsečkami. Úsečky představují přibližný průběh tlaku, viz obr. 2.6. Není již potřeba si pamatovat, jak vypadal původní průběh, ale pouze konkrétní zaznamenané body – v zobrazeném případě časový okamžik a hodnotu napětí. Diskrétní hodnoty mají přímou závislost na analogovém signálu – číslcový záznam je tvořen vzorky analogového průběhu [7]. Tímto zjednodušením je způsobena určitá chyba. Použije-li se velké množství bodů (malý časový krok), z hlediska úrovně pozorování je možné chybu považovat za nepodstatnou (v závislosti na požadované přesnosti) a počítat s diskrétními hodnotami. Tímto způsobem lze analyzovat „analogové signály“, i když je reálně v daný moment pracováno s číslcovými údaji. Je nutné pracovat pouze s čísly, protože při zpracovávání signálu je v počítači k dispozici omezená paměť a výpočetní výkon. Záznam spojitě reálného měřeného průběhu by zabíral na disku teoreticky nekonečně velké místo a takové množství dat nelze uchovávat, zkoumat a ani s ním jinak pracovat.

Digitální přístroje měří hodnoty pouze v určitých časových okamžicích a tyto hodnoty jsou zaznamenávány. Jinak je tomu u analogových přístrojů, které převádí aktuální hodnotu pozorované veličiny na diskrétní bod. Pro převod z analogového signálu na diskrétní se používají A/D převodníky<sup>2</sup>. Na výstupu má signál již číslcovou podobu, se kterou umí běžné počítače pracovat. Číslcové signály, které byly vytvořeny z analogových signálů procesem vzorkování<sup>3</sup>, nazýváme *vzorkovanými signály* [1].

<sup>2</sup>Elektronická součástka učená pro převod z analogové do digitální podoby. Je možné se setkat také s označením ADC = Analog to Digital Converter [7]

<sup>3</sup>Vzorkování je proces, při kterém se z analogového signálu získají jeho vzorky na časové ose. Tyto vzorky se nachází jen v určitých časových okamžicích a podél časové osy jsou zpravidla rozprostřeny pravidelně. S pojmem vzorkování souvisí také termín kvantování. O této problematice se lze dozvědět více např. z [27].

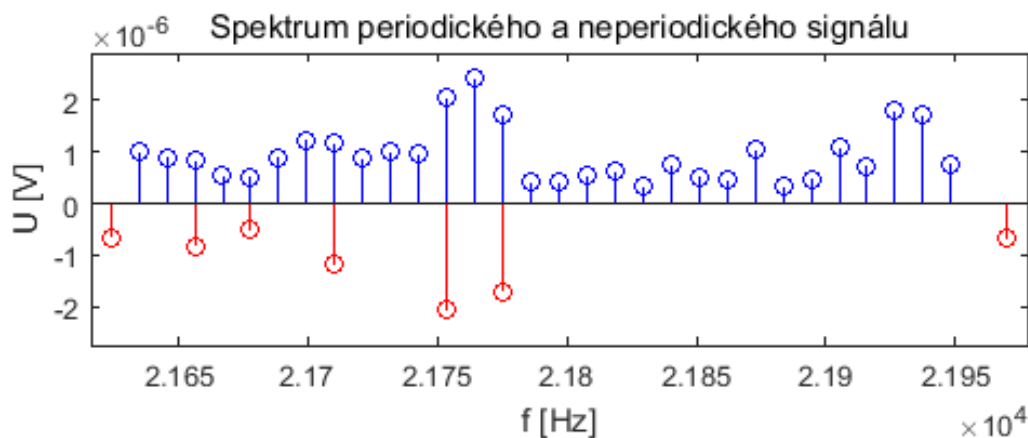
## 2.2. SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA



Obrázek 2.6: Přibližný průběh (červená) proložením diskrétních hodnot (modrá).

### 2.2.3. Spektrum harmonického signálu

Harmonický průběh je charakterizován pomocí funkce sinus nebo cosinus. Jedná se o nej-jednodušší průběh signálu. Pokud je znázorněna funkce sinus v spektrální oblasti, zobrazí se pouze jednou diskrétní hodnotou. Jedná-li se o periodický harmonický signál, lze v grafu na frekvenční ose vidět, že jsou jednotlivé složky od sebe vzdáleny vždy o stejnou hodnotu, viz obrázek 2.7 – modrý graf. Díky mezi frekvencemi jsou pořád stejné a poměry



Obrázek 2.7: Spektrum periodického (modrý) a aperiodického (červený) signálu.

frekvencí lze vyjádřit pomocí celočíselného zlomku. Tento děj je typický pro hudební nástroje. U neharmonického signálu je tomu naopak a poměr frekvencí jednotlivých složek je proměnlivý (červený graf).

Úplně první složka periodického spektra, která odpovídá nulové hodnotě frekvence, udává střední hodnotu časového průběhu signálu. Funkční hodnota je v tomto případě rovna statické výchylce [16]. Je-li střední hodnota záporná, projeví se to ve fázovém spektru. Druhá složka určuje kmitočet časového průběhu signálu – má stejnou hodnotu jako je opakovací kmitočet časového průběhu. Je známá pod pojmem *první harmonická frekvence*, i když je v pořadí až druhá [7].

#### 2.2.4. Čárové (diskrétní) spektrum

Čárové spektrum, jak již název napovídá, je složeno z navzájem oddělených „čar“ – bodů reprezentujících konkrétní frekvence. Tento stav je typický pro periodické děje. V případě harmonického děje by měla být vidět pouze jedna hodnota frekvence s příslušnou amplitudou, která je reprezentována délkou čáry (hodnota na svislé ose). Spektrum, ve kterém se vyskytují pouze diskrétní hodnoty, se nazývá *diskrétním spektrem* [1], [19].

Na druhou stranu spektrum spojitě (kontinuální) má rozložené frekvenční složky po celé ose nebo v nějakém omezeném intervalu. Spojité spektrum je typické pro neperiodické děje, pro které platí, že jejich perioda roste nade všechny meze. Lze si to také představit tak, že se jednotlivé spektrální čáry k sobě blíží natolik, že vyplňují spojitě celou frekvenční osu nebo daný interval [7]. V tomto případě již délka čáry neudává amplitudu, avšak je zaveden výraz *spektrální hustota*, která číselně odpovídá amplitudě připadající na pásmo o šířce 1 Hz.

Při zpracovávání signálu je používán počítač, který pracuje s diskrétními hodnotami a jako výsledek udává opět konkrétní číselná data. Je logické, že i v tomto případě bude spektrum složeno z konečného počtu hodnot, které je nutné uložit do paměti počítače [1]. Navzdory omezenému počtu analyzovaných vzorků je možné zjistit přibližnou velikost spektrální hustoty. Při dostatečném zkrácení vzdálenosti mezi jednotlivými frekvenčními složkami (za pomoci interpolace a numerického integrování) lze snížit vzniklou chybu a dosáhnout předepsané přesnosti [7].

#### 2.2.5. Fourierova transformace

Fourierův teorém říká, že jakoukoli periodickou funkci lze rozložit na nekonečnou řadu harmonických funkcí s příslušnými amplitudami a fázemi [21]. Teoreticky lze dle Fourierova teorému vytvořit jakkoli složitý průběh pomocí jednodušších funkcí. Zároveň je možné všechny periodické průběhy rozložit na nekonečnou řadu harmonických signálů. Nejčastěji používaná je tzv. *Fourierova řada*, která jako базовé funkce<sup>4</sup> využívá již zmíněné harmonické průběhy – funkci sinus a cosinus [21]. Pro snadnější práci lze pomocí Eulerova vzorce

$$e^{ix} = \cos(x) + i \cdot \sin(x) \quad (2.12)$$

upravit součet funkce cosinus a imaginární složky sinus na komplexní exponenciálu. Exponenciální tvar je běžné vyjádření, se kterým se lze setkat ve většině odborné literatury.

<sup>4</sup>Bázové jsou takové funkce, které jsou definovány jako základní a posléze je snaha složitý průběh rozložit na řadu těchto funkcí o různé amplitudě, fázi nebo kmitočtu.

## 2.2. SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA

K reálnému použití Fourierovy řady musí být splněny určité matematicko-teoretické podmínky. Další problém spočívá v tom, že není možné numericky sčítat nekonečné řady, sečte se pouze konečný počet členů. Tímto je způsobena jistá chyba a jedná se tedy o aproximaci hledané hodnoty. Naštěstí důležitost každé složky klesá s pořadovým číslem. Sečte-li se proto dostatečný konečný počet prvků řady, avšak jsou zanedbány zbylé členy, je možné aproximovat výsledek s velmi malou chybou. [7] K nalezení spektra signálu je potřeba zjistit konkrétní hodnoty jednotlivých členů Fourierovy řady. Nalézt jednotlivé koeficienty znamená analyticky vypočítat určité integrály. Navíc je nutné znát analytické vyjádření funkčního vztahu pro časový průběh periodického signálu. Jedná se o dosti omezující podmínku, kvůli níž není možné spočítat mnoho periodických průběhů. Podmínky, které musí signál splňovat, aby mohl být vyjádřen pomocí Fourierovy řady, se nazývají *Dirichletovy podmínky*. Pokud signál splňuje všechny potřebné podmínky, je možné nalezení jeho spektra. Vypočtené frekvenční spektrum by bylo složeno z čar a vzdálenosti mezi jednotlivými čarami – složkami jsou dány opakovacím kmitočtem časového průběhu. Fourierovu řadu nelze aplikovat na neperiodické děje, lze z ní však odvodit Fourierovu transformaci (FT) tím, že připustíme nekonečnou dobu periody, která je typická pro aperiodické signály.

K převedení signálu z originální do spektrální oblasti lze použít některou z lineárních transformací. Fourierova lineární<sup>5</sup> integrální transformace je zobrazení, které každé funkci (originálu) přiřazuje odlišnou funkci (tzv. obraz) [15]. Jinak řečeno, je to matematický aparát, pomocí kterého je možné převádět průběh z časové do frekvenční oblasti a naopak. Pro spojitý signál  $s(t)$  je FT definovaná vztahem

$$S(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-i\omega t} dt, \quad \text{kde } \omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (2.13)$$

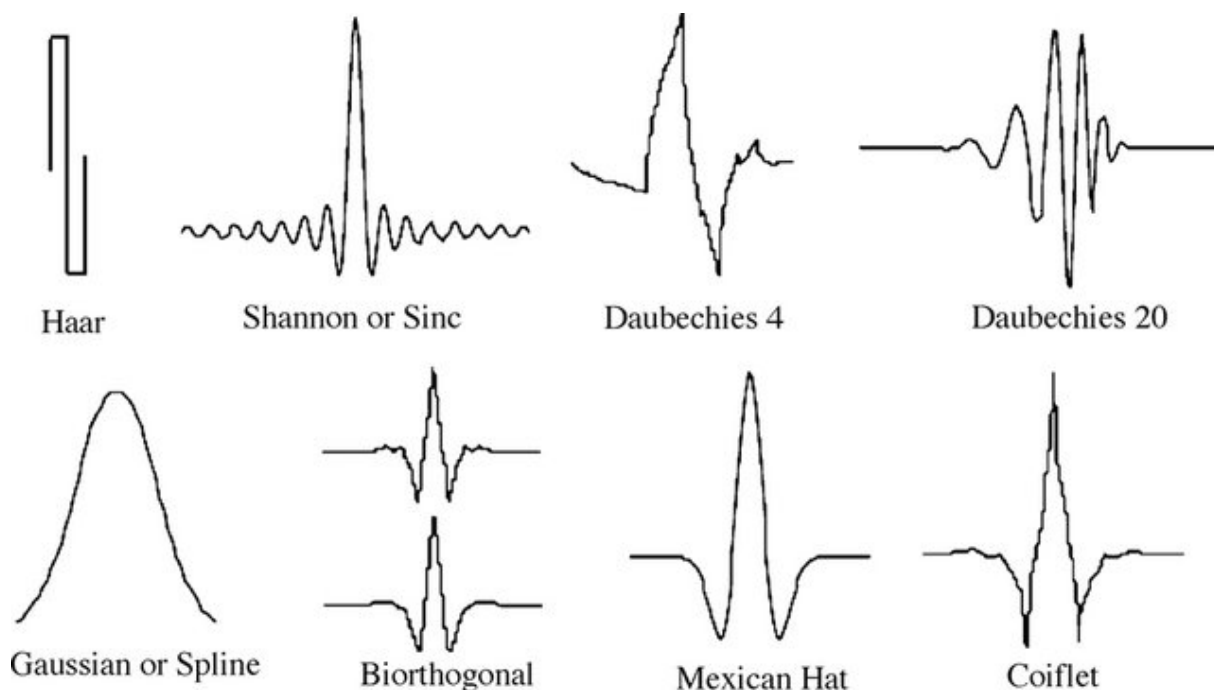
$\omega$	úhlová frekvence [ $s^{-1}$ ]
$S(i\omega)$	Fourierovo spektrum spojitého signálu
$s(t)$	časový průběh signálu

Ačkoli je FT vhodná pro periodické děje, lze ji využít i pro neperiodické. Prvním způsobem je nahlížení pouze na část dat (určitý výsek) za předpokladu, že vně se funkce chová jako periodický signál. Tento přístup se nazývá *krátkodobá Fourierova transformace* (short-time Fourier transform). Není ale vhodné signál rozdělit pouze na obdélníková okna, protože na rozhraní mezi okny vznikají nespojitosti, které se ve spektru projeví výskytem nežádoucích frekvencí. Signál se proto často konvoluje s tlumící váhovou funkcí, která zajišťuje nulové hodnoty na okraji a vně zvoleného úseku. Ve výsledku může spektrum signálu vyhladit, případně zvýraznit lokální maxima [13]. Nastává ovšem dilema, kterou váhovací funkci vybrat a aplikovat. Nevhodná volba ovlivní tvar frekvenční nebo časové charakteristiky. Často používaným oknem u frekvenční analýzy je *Hannovo okno*. Pro zvýraznění harmonické složky spektra v šumu je vhodné *Blackmanovo okno* [17]. Existuje celá řada váhovacích oken – vždy je potřeba si uvědomit, čeho se použitím filtru dosáhne a je nutná velká obezřetnost, zda se tímto způsobem průběh naopak neznehodnotí.

Druhý způsob FT neperiodického signálu je použití složitější báze funkce. Možnou alternativou k Fourierově transformaci je vlnková transformace (wavelet transform), o které se lze více dozvědět např. z [20]. Příklady používaných vlnkových funkcí lze vidět na obr. 2.8.

---

<sup>5</sup>Lineární znamená, že funguje v soustavě princip superpozice.



Obrázek 2.8: Příklady vlnkových funkcí [28].

### 2.2.6. Diskrétní Fourierova transformace

Většina signálů je velmi složitá, a proto je pro ně analytické vyjádření příliš komplikované. Vztah FT pro spojitý signál je použitelný pouze v omezeném počtu případů. Modifikace pro konečnou deterministickou posloupnost čísel se nazývá *diskrétní Fourierova transformace* – *DFT*<sup>6</sup>. DFT představuje jistou aproximaci k spojitě FT, protože je k dispozici pouze konečný počet vzorků po určitých časových intervalech vyjmutých z původně spojitěho signálu. Kvůli tomu se ztrácí určitá přesnost, avšak je získána možnost řešení pomocí číslicových počítačů.

Každý signál má určité charakteristiky. Mezi základní vlastnosti digitálního signálu patří počet diskrétních hodnot záznamu – *délka záznamu*  $N$ . Jednotlivé body jsou od sebe vzdálené stále o stejnou hodnotu  $\Delta t$  – *interval vzorkování* [22]. *Vzorkovací frekvence* je dána vztahem

$$f_{vz} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{T_{vz}}. \quad (2.14)$$

Za *periodu signálu*  $T$  je považován celkový čas zkoumaného signálu. *Krok na frekvenci* určuje, jak jsou od sebe vzdálené dvě rozlišitelné hodnoty frekvence – ovlivňuje přesnost měření a je dán vztahem

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} = \frac{1}{T}. \quad (2.15)$$

$\Delta f$       krok na frekvenci [Hz]

Vztah (2.15) značí, že čím větší je celková délka signálu, tím menší je krok na frekvenci. Prodloužení záznamu zvýší přesnost, avšak pro zpracování je třeba lepší výpočetní apa-

<sup>6</sup>Předpokládá ekvidistantní rozdělení bodů na kmitočtové ose.



## 2.2. SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA

rát. Vztah pro diskrétní konečnou FT vznikne přechodem od integrálu k sumě a úpravou vztahu (2.13) do finální podoby

$$S(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-ikn\omega} \quad \text{pro } k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.16)$$

kde je  $\omega = 2\pi\Delta f$ .

$S(k)$  Fourierovo diskrétní spektrum

$N$  počet vzorků

$s(n)$  originální průběh diskrétního signálu

Výraz poskytuje pro  $N$  vzorků signálu stejný počet vzorků spektrální funkce. Vzorky spektrální funkce  $S(k)$  obsahují obecně komplexní čísla – lze vypočítat amplitudová i fázová spektra. Inverzní podoba, která převádí signál ze spektrálního zobrazení na vzorky originální funkce má tvar

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \cdot e^{ikn\omega} \quad \text{pro } n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2.17)$$

Velkou nevýhodou této metody je výpočetní složitost a tím i dlouhá doba řešení. Celkový počet operací přibližně roste s kvadrátem počtu prvků  $N$ . Pro krátké záznamy je doba řešení únosná, avšak při nárůstu počítaných diskrétních hodnot se doba řešení neúměrně zvyšuje.

### 2.2.7. Rychlá Fourierova transformace

Se snahou zrychlit výpočet DFT byla objevena numerická metoda, která dokáže výrazně snížit celkový počet operací, primárně počet násobení, protože pro všechny výpočetní systémy je násobení časově náročnější než sčítání [23]. Rychlá Fourierova transformace – FFT (fast Fourier transform) je efektivní algoritmus (popř. série algoritmů) pro výpočet DFT a její inverze [13]. Pro velmi dlouhé záznamy se může snížit celkový čas řešení o více než 99 %. Pokud je délka záznamu mocninou 2, závislost již není kvadratická, nýbrž se velmi blíží lineární. Nejnáročnější je výpočet signálu, jehož délka záznamu ( $N$ ) je rovna prvočíslu. V takovém případě je úspora nejmenší, ačkoli dnes již existují algoritmy, pomocí kterých lze tento problém efektivně vyřešit. Např. Bluesteinův FFT algoritmus pro výpočet DFT o velikosti prvočísla [29].

Při práci se signály se často místo konkrétní výchylky využívá efektivní hodnota ( $\neq$  průměrné hodnotě). Vyjadřuje hodnotu, při které má signál konstantního průběhu stejný energetický účinek, jako pozorovaný průběh [24], [25]. *Efektivní hodnotu* – rms (*root mean square*) lze pro diskrétní signál určit ze vztahu

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} S(k)^2}. \quad (2.18)$$

$S(k)$  Fourierovo diskrétní spektrum

$S_{rms}$  efektivní hodnota signálu  $S$

$N$  počet vzorků



V závislosti na zvoleném počtu vzorku lze spočítat efektivní hodnotu pro celý signál nebo pro jednotlivé úseky (*moving rms*). Při výpočtu dílčích efektivních hodnot jen z několika málo bodů se výsledný průběh „vyhladí“ a do určité míry zakryje extrémní hodnoty [26].

## 2.3. Hluk a vibrace

Za hluk je považován veškerý nežádoucí nebo nepříjemný zvuk, který člověka poškozuje, ruší nebo obtěžuje. Rozlišování hluku je velmi subjektivní, ale mezi 2 a 5 kHz je sluch náchylnější k rychlejšímu poškození než u jiných frekvencí [30]. Vnímání hluku je závislé nejen na podnětu a jeho fyzikálních vlastnostech, ale i na faktorech sociální, psychologické nebo ekonomické povahy. Nemalý význam mají i další faktory:

- vztah jedince k danému hluku (je rozdíl, zda cirkulárku používám já nebo soused),
- zda je hluk očekávaný či nikoli,
- pocit, do jaké míry lze hluk ovlivnit [31].

Základním parametrem popisujícím účinek hluku je akustická intenzita.

Hluk má negativní vliv na fyzické i psychické zdraví. Snižuje produktivitu a kvalitu práce, dokonce může vyvolat trvalé následky – poškození sluchového orgánu, poruchy spánku, pískání v uších, afektové nebo depresivní stavy, vysoký krevní tlak atd. [1], [30]. Hluk je velice nebezpečný, neboť lidské tělo není schopné se proti němu samo bránit, jako je tomu např. u zrakového orgánu, kde při nadměrném vystavení viditelného záření stačí „zavřít oči“. Z výše uvedených důvodů je zřejmé, že tlumení nadbytečného hluku stále více roste na důležitosti. Vyvíjejí se metody, které by tento problém efektivně vyřešily.

Při snižování hluku v oblasti konstrukce je snaha nejdříve zjistit pravou příčinu jeho vzniku. Jako zdroj se může jevit celá soustava, avšak reálně může vyzařovat hluk pouze určitá část, která lze snadněji ztlumit. Proto je nutné použití speciálních měřicích přístrojů ke správnému určení pravého zdroje hluku.

Jsou rozlišovány dvě příčiny vzniku hluku. V prvním případě vzniká zvuk v důsledku chvějících se tuhých těles – mechanický zdroj. Těleso předává kinetickou energii vzduchu, která se projeví jako akustický hluk. Vlastnosti zvuku jsou závislé na rozměrech tělesa a charakteristikách kmitání. Druhý způsob je spojený s neustáleným prouděním prostředí – aerodynamické zdroje [1]. Do této kategorie spadá hluk vznikající v důsledku turbulentního proudu, při výtoku tekutiny z dýzy, obtékání těles, jako nechtěný produkt ventilátorů a hluk potrubní sítě.

Tlumení lze realizovat pomocí prvků a materiálů, které vlnění pohlcují. Tím je myšlena přeměna akustické (mechanické) energie na jiný druh energie – většinou na energii tepelnou. Tyto přeměny mohou být způsobeny v důsledku tření, kolísání akustického tlaku nebo nepružných deformací těles [1]. Opatření, která se na pracovištích používají, lze shrnout do následujících bodů:

- konstrukční úpravy strojů,
- použití krytů a překážek,
- použití tlumičů hluku,

## 2.3. HLUK A VIBRACE

- použití izolátorů chvění,
- použití speciálních materiálů omezujících vyzařování hluku,
- změna technologie,
- vhodné rozmístění zdrojů hluku a chráněných prostor,
- organizace práce a provozu zařízení.

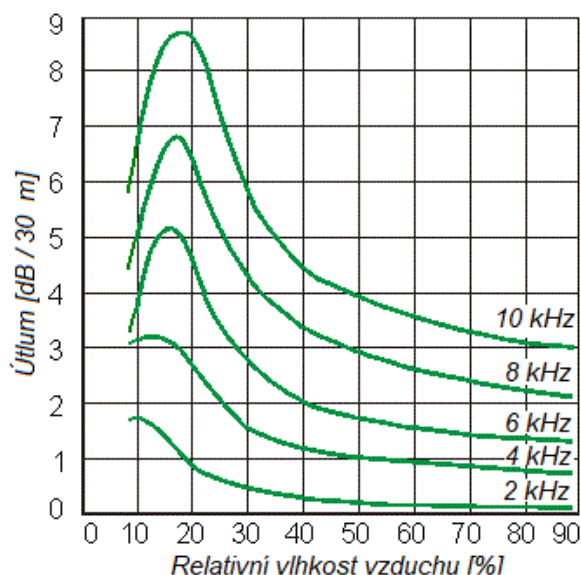
Kapitola 2.3 čerpá z literatury [1], [2], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36].

### 2.3.1. Útlum zvuku vlivem absorpce ve vzduchu

Při šíření vlnění v reálném prostředí (vzduchu) klesá akustická energie s uraženou vzdáleností vlivem rozptýlení energie do prostoru. *Klasická absorpce* tvrdí, že zvuková vlna předává energii svému okolí ve formě tepla – přeměna akustické energie na tepelnou (vlivem vedení a vyzařování tepla, ale i viskozity a difúze). Množství energie je úměrné druhé mocnině kmitočtu přenášeného signálu.

Druhý důvod úbytku energie je tzv. *molekulární absorpce*. Ta je založena na relaxaci při pohybu molekul kyslíku. Snížení intenzity zvuku je závislé na relativní vlhkosti média [1]. Celkový útlum vlivem absorpce ve vzduchu je kombinací obou principů, který je znázorněn na obr. 2.9. Z obrázku lze vyvodit, že největší útlum nastává při relativní vlhkosti vzduchu od 0 % do 30 % a roste s kmitočtem.

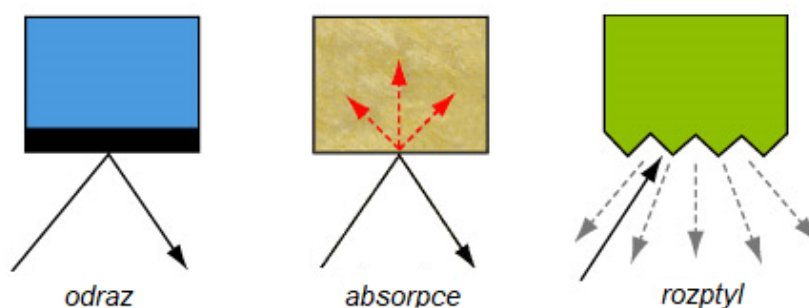
Často se stává, že molekulární absorpce značně převyšuje klasickou, která je v takovém případě zanedbána. Obecně se jedná o přirozený útlum, který je při malých vzdálenostech nepatrný a značný význam nabývá až od vzdálenosti několika desítek či stovek metrů.



Obrázek 2.9: Útlum zvuku vlivem absorpce na vzduchu [37].

### 2.3.2. Kontakt vlny s překážkou

Při dopadu zvukové vlny na překážku může nastat několik situací – vlna se může odrazit, vstřebat nebo projít do prostoru za překážkou, případně dojde ke kombinaci více druhů. Graficky jsou znázorněny jednotlivé případy na obr. 2.10. Odraz nastává většinou u tuhé, masivní stěny (např. z betonu a cihel). Protože zvuková vlna nemá v těchto materiálech dostatek energie na šíření, odrazí se zpět opačným směrem, než kterým přišla (popř. pod úhlem v závislosti na úhlu dopadu). Při kontaktu s nepravidelným povrchem (např. pěnou) se může vlna rozmělnit do více směrů nebo pokračovat podél stěny. Poslední způsob interakce je pohlcení akustické energie. Materiály, které při styku s akustickým vlněním snadno pohltnou jeho energii, se nazývají absorpční [35].



Obrázek 2.10: Odraz, absorpce a rozmělnění vlny [35].

### 2.3.3. Přístupy potlačování přenosu hluku

Nejefektivnější způsob tlumení hluku je nějakým způsobem vložit akustické vlně do cesty vakuum, protože bez žádného média se zvuk nedokáže šířit. Tento způsob je však nepraktický a extrémně náročný na realizaci, proto je jeho využití velmi omezené [35]. Mezi základní principy potlačování hluku patří pasivní a aktivní přístup. Pasivní přístup tlumení je založen na použití:

- zvukových bariér z hutných materiálů,
- porézních zvukově absorpčních materiálů,
- viskoelastických materiálů.

Pasivní přístup má relativně malou účinnost pro hluk nízké frekvence (pod 1kHz) a je použitelný spíše pro statické soustavy. Kvalitní odhlučnění je tímto způsobem pro dopravní prostředky velmi problematické vzhledem k poměrně velkým objemům nebo hmotnostem použitelných materiálů [30].

Aktivní přístup je založen na interferenci vln. Systém je složen z mikrofónů, reproduktorů a počítače. Na základě snímaného zvuku se vytvoří vlna se stejnou amplitudou, ale opačnou fází, která „vyruší“ původní zdroj hluku a výsledná změna akustického tlaku je teoreticky nulová. Tento způsob má mnoho nevýhod – je použitelný jen na malém prostoru (např. kokpit nadzvukových stíhaček), není ještě příliš odladěný, navíc realizace a provoz systému jsou velmi nákladné [30].

Snaha nalézt novou metodu, která by zkombinovala oba způsoby, se zdá jako nejlepší cesta při boji s hlukem. Metoda, která snižuje vyzařovaný hluk z kmitající soustavy, je

## 2.3. HLUK A VIBRACE

známá pod zkratkou ASAC (*Active Structural Acoustics Control*). Používají se zde semi-aktivní a plně aktivní měniče. Snížení hluku může mít ovšem za následek zvýšení vibrací této struktury, což může ovlivnit fungování součástí. Při úplném pokrytí problematického povrchu tělesa vrstvou aktuátorů se nezmění vibrace, avšak zvýší se odpor tělesa proti vyzařování akustické energie.

Další způsob útlumu je potlačení intenzity zvuku pouze v určitých částech spektra prostřednictvím malé změny rozložení amplitud a fází. Tím lze snížit celkový akustický výkon zdroje nebo alespoň pozměnit směrovou charakteristiku. Používají se různé druhy aktuátorů, které jsou založené zejména na piezoelektrickém, elektrodynamickém a magnetostrikčním principu [34]. Jednou z inovativních možností je využití již zmíněného piezoelektrického materiálu a metody aktivního řízení elastických vlastností materiálu [30].

### 2.3.4. Rozdělení

Tlumení hluku je závislé na druhu prostoru. Způsob, který je vhodný pro železniční dopravu, již nemusí být využitelný v kancelářských prostorách. Z tohoto důvodu jsou řešení rozdílná a tlumení je vždy zaměřeno na konkrétní případ. Obecné dělení je na prostory venkovní, malé uzavřené a velké uzavřené. V odborné literatuře se další dělení liší a lze se setkat s nejrůznějšími variacemi. Zde je uvedeno rozdělení tlumení hluku podle docenta Richarda Nového [1].

#### Mechanické zdroje hluku

- Strojní zařízení a dílny
- Budovy a obydlí
- Dopravní prostředky
- Hluk hořáků

#### Aerodynamické zdroje zvuku

- Turbulentní proudění
- Při výtoku tekutiny
- Při obtékání těles
- Ventilační soustavy
- Potrubní sítě

Jednotlivé kategorie jsou často navzájem propojené. Pro úplné pochopení konkrétního problému je mnohdy nutný náhled na kombinaci výše zmíněných zdrojů.

### 2.3.5. Snižování hluku v potrubních systémech – zvuk v trubici

V potrubích obvykle proudí vzduch při vyšších rychlostech – jedná se o turbulentní proudění. Při tomto proudění vzniká hluk. Mimo to může vznikat hluk buzením stěny potrubí, které potom funguje jako dílčí zářič akustické energie. Hluk může vznikat, ale i zanikat v jednotlivých částech potrubní sítě. Jedná se o tvarovky, klapky, kulisové tlumiče hluku<sup>7</sup>, koncové prvky sítě, vyústky, trysky nebo mříže. Některé hluky lze ještě před vyústěním ztlumit speciálním tlumičem hluku, u jiných je nutná redukce rychlosti proudícího média [1].

Konstrukce určené k pohlcování hluku lze rozdělit do dvou skupin – uspořádání, která se chovají jako kmitající deska, nebo membrána a uspořádání pracující na principu Helmholtzova rezonátoru. První zmíněné jsou absorpční tlumiče hluku, které se vkládají

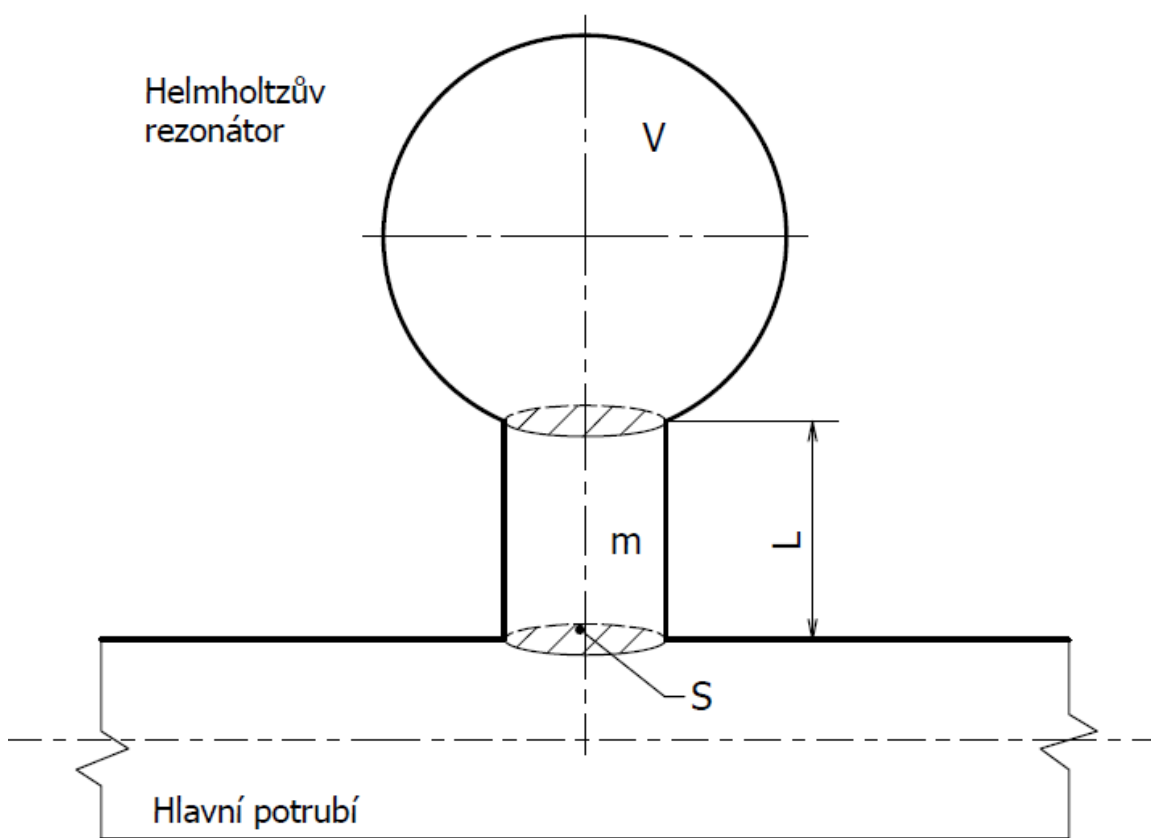
---

<sup>7</sup>místa náhlého zúžení (vtoku) nebo rozšíření (výtoku)

do potrubí. Jedná se o velmi používané širokopásmové tlumiče, které našly uplatnění např. v sacích a výfukových potrubních systémech plynových turbín. Zeslabují hluk přeměnou akustické energie na tepelnou energii způsobenou třením kmitajících částic plynu v mezerách a dutinách pórovitých materiálů. U těchto materiálů je snaha zvolit vhodný kompromis mezi požadovaným útlumem, hydraulickými ztrátami, rozměry samotného tlumiče, pořizovací cenou a životností, neboť jednotlivé požadavky jsou vzájemně protichůdné [1], [2].

### 2.3.6. Helmholtzův rezonátor

Druhý způsob tlumení hluku v potrubí je založen na principu Helmholtzova rezonátoru. Pod tímto názvem si lze zjednodušeně představit např. prázdnou láhev od piva. Rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu  $V$  a hrdlem spojující hlavní potrubí<sup>8</sup> s dutinou. V hrdle se nachází vzduch o hmotnosti  $m$ . Na obr. 2.11 jsou zjednodušeně zakresleny jednotlivé parametry. Jedinou látkou v rezonátoru je vzduch, proto je vhodné pro lepší představu a popis fungování použít analogii z mechaniky těles. Vzduch v dutině se chová jako pružina (má určitou poddajnost) a hmota v hrdle jako píst. Jakmile se akustická vlna z hlavního potrubí dostane ke vzduchu v hrdle (pístu), stlačí ho. Jelikož je píst spojen s pružinou, začne kmitat. Pohybu pístu je kladen odpor třením o stěny hrdla, kde se akustická energie mění na tepelnou a tím se hluk tlumí [1].



Obrázek 2.11: Helmholtzův rezonátor spojený s hlavním potrubím [1], upraveno.

<sup>8</sup>Za hlavní potrubí lze považovat prostor, ve kterém primárně proudí tekutina

### 2.3. HLUK A VIBRACE

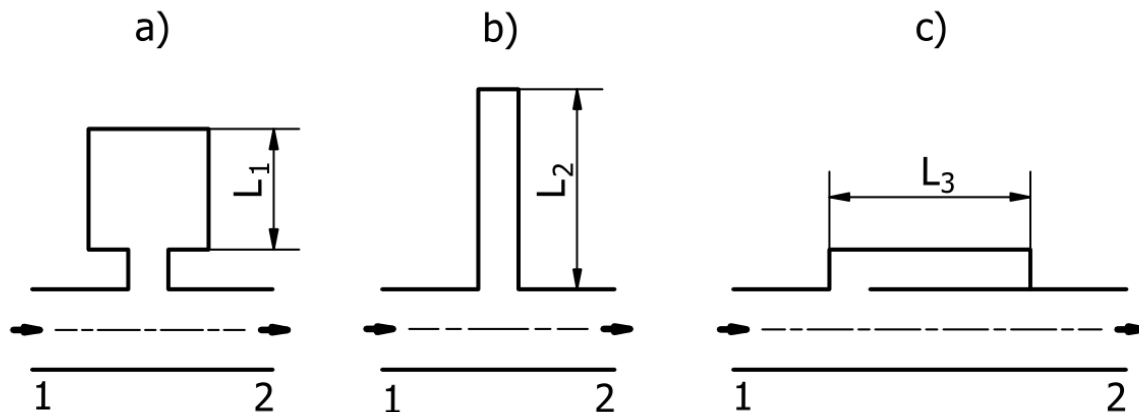
Na příkladu láhve od piva lze provést jednoduchý experiment. Proudí-li vzduch kolem hrdla láhve, je možné ji rozvibrovat na vlastní frekvenci. Mechanické vibrace jsou poté přenášeny do okolí ve formě zvuku a lze rozeznat, na jaké frekvenci láhev kmitá. Pokud je do láhve přidána trocha vody a experiment je zopakován, soustava se přeladí v důsledku změny objemu vzduchu v láhvi. Soustava je vždy spojena s určitou frekvencí (popř. jejím násobkem). Helmholtzův rezonátor při použití jako tlumič má stejnou vlastnost. Tlumí efektivně pouze úzké kmitočtové pásmo a zbylou část spektra jen velmi málo nebo dokonce naopak může hluk zesílit. Aby rezonátor správně fungoval, musí se umístit mimo uzel tlaku v daném potrubí, ideálně do kmitny tlaku. Při návrhu reálné konstrukce vzniká problém uvážení hmotnosti vzduchu, který způsobuje ztrátu energie – chová se jako píst. Hmotnost vzduchu, která se nachází v těsné blízkosti před a za pístem, se může chovat podobně. Jedná se o část objemu z hlavního potrubí a část z dutiny rezonátoru. Obvykle se připočítá k délce hrdla 0,6 průměru z venkovní části a jeden průměr z vnitřní části rezonátoru [36]. Vlastní frekvenci rezonátoru lze určit ze vztahu

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{VL}}. \quad (2.19)$$

$S$	průřez hrdla [ $m^2$ ]
$L$	délka hrdla [ $m$ ]
$V$	objem dutiny [ $m^3$ ]

Určení celkového objemu (popř. hmotnosti), který kmitá v oblasti hrdla, se liší v závislosti na geometrii. Navrhnout vhodné konstrukční řešení rezonátoru je velmi obtížné a s uvážením úzkého frekvenčního spektra útlumu je použití v praxi značně omezené.

Existují různá provedení rezonátorů. Příklady lze vidět na obrázku 2.12, které byly použity při návrhu tlumiče za turbokompresorem v [32].



Obrázek 2.12: Příklady provedení rezonátorů [32], upraveno.

Případ s úzkým hrdlem a širší dutinou (obr. 2.11 a 2.12a) je typický Helmholtzův rezonátor, kdežto u ostatních případů se může terminologie lišit. Označme zbylé případy pod souhrnným názvem laděná odbočka<sup>9</sup>. Laděná odbočka funguje na podobném principu, avšak je použitelná pouze pro vyšší frekvence, neboť pro nízké frekvence vychází příliš

<sup>9</sup>V anglické literatuře je označení laděné odbočky *quarter-wave resonator*, popř. obecně názvem *side-branch resonator* [32].

dlouhá [33]. Hlavním parametrem ovlivňujícím frekvenci naladění je délka laděné odbočky, kterou lze vypočítat ze vztahu

$$L = n \cdot \frac{c}{4f_r}, \quad \text{pro } n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.20)$$

$f_r$  frekvence naladění rezonátoru [Hz]

$L$  délka laděné odbočky [m]

Vztah (2.20) ovšem nebere do úvahy vliv kmitajícího vzduchu v místě přechodu, což může být pro velmi malou délku laděné odbočky nepřesné.

### 3. Návrh experimentu

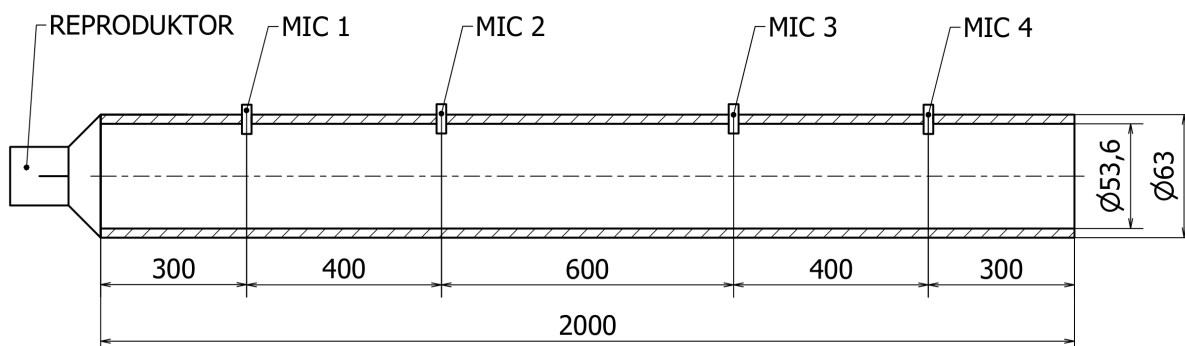
Laděná odbočka se používá, když je potřeba zatlumit zvuk o konkrétní frekvenci nebo pro velmi úzké kmitočtové pásmo. Cílem této práce je zjistit, zda se laděná odbočka s velmi krátkou délkou<sup>10</sup> bude chovat podle vzorce (2.20). Dále je cílem určit, zda a o kolik se posune frekvence naladění odbočky v důsledku kmitajících částic v okolí přechodu mezi laděnou odbočkou a hlavním potrubím a zjistit útlum způsobený laděnou odbočkou.

V následující kapitole bude popsán návrh měřicí tratě, způsob buzení soustavy a zařízení nutná k provedení experimentu.

#### 3.1. Návrh a popis měřicí tratě

Při návrhu měřicí tratě musely být zvažovány různé aspekty. První z nich je zkoumaná frekvence, na kterou bude celá soustava dimenzovaná. V návaznosti na reálný problém byl zvolen interval frekvencí  $< 0,5; 5 >$  kHz. Z důvodů nízkých pořizovacích nákladů a relativně malého celkového rozměru tratě bylo hlavní potrubí vyrobeno z PVC-U trubky o vnějším průměru 63 mm a délce 2 m. Délka byla vybrána s ohledem na zvolené pásmo frekvencí – při použití spodního intervalu kmitočtů je délka potrubí větší než vlnová délka akustické vlny, která se v potrubí šíří. Při zvedání kmitočtu se vlnová délka zmenšuje, proto je rozměr vztažen na spodní hranici kmitočtového pásma. Zvoleným kritériem bylo, aby se po délce tratě rozprostřely nejméně 3 vlny.

Na začátku potrubí (vlevo) se nachází reproduktor, který je připevněn k potrubí. Na trati jsou umístěny 4 mikrofony ve vzdálenostech znázorněných na obrázku 3.1. První



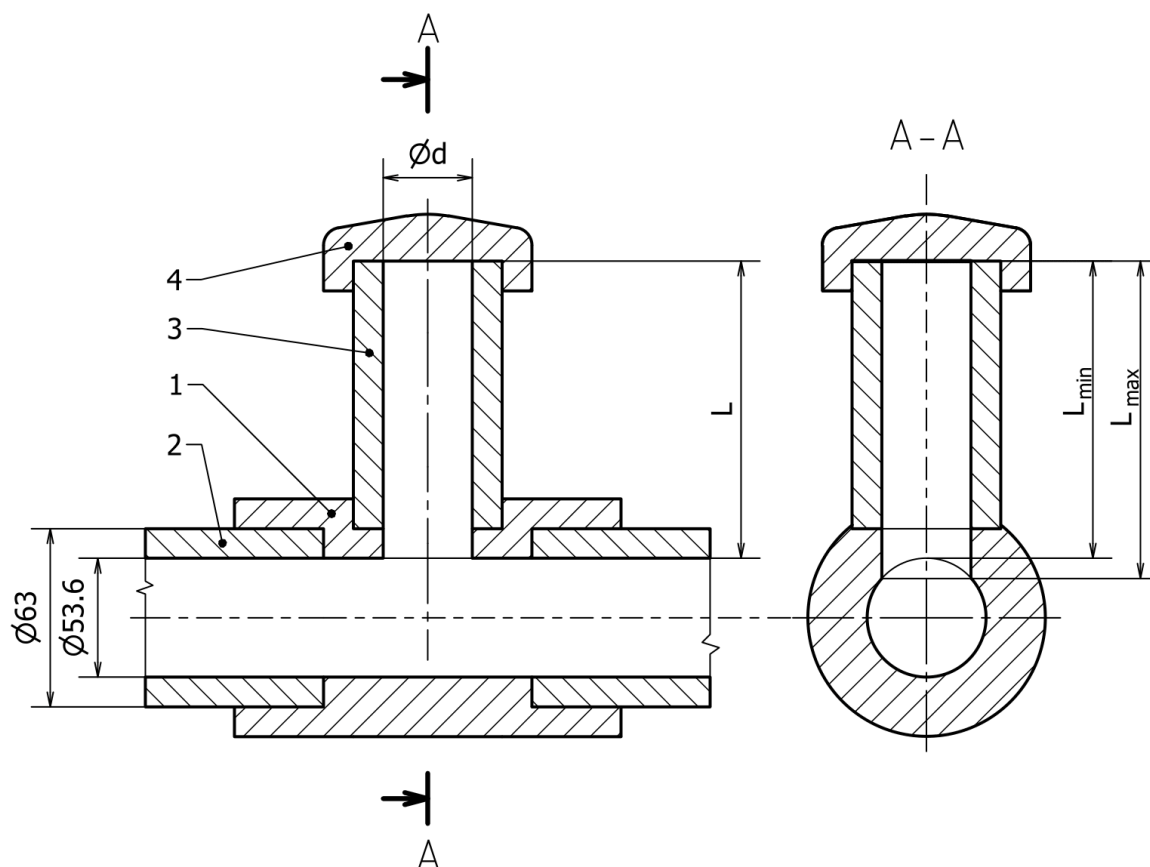
Obrázek 3.1: Schéma tratě bez laděné odbočky.

navrhovaná trať je bez laděné odbočky, aby byl zjištěn útlum vlastní soustavy na určité délce. Po změření útlumu navržené soustavy byla připojena k trati laděná odbočka. Ze dvou navržených konceptů bylo vybráno pouze jedno konečné řešení.

První koncept je řešen připojením vedlejšího potrubí, které má menší průměr a délku čtvrtinu vlnové délky příslušné frekvence. Celé schéma je zobrazeno v řezu na obrázku 3.2. Hlavní potrubí (1) je uprostřed rozděleno na dvě části, mezi které je vložen mezikus (2). Díky této součásti lze spojit laděnou odbočku s hlavní trasou bez výskytu nadbytečných náhlých změn průřezu. Z katalogu výrobce trubek je možné zakoupit tvarovku určenou

<sup>10</sup>Délka rezonátoru je srovnatelná s průměrem potrubí, na které se připojí laděná odbočka.



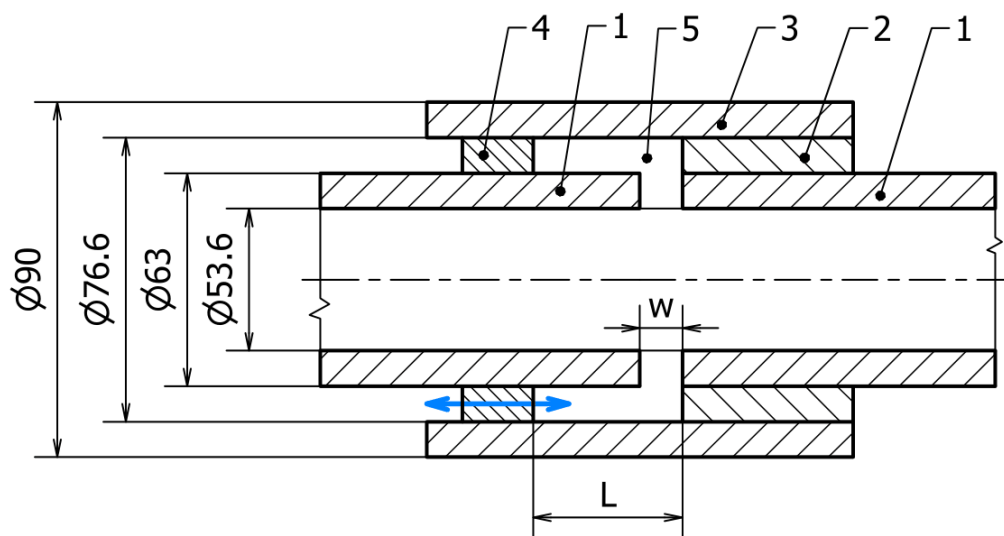


Obrázek 3.2: Schéma prvního návrhu laděné odbočky

k připojení další větve (T-kus), avšak při použití této varianty by se v oblasti přechodu vyskytly nežádoucí změny průřezu. Kvůli velkému ovlivnění přechodové zóny byla varianta s kupovanou tvarovkou vyřazena z dalších úvah. Na konec odbočky je přidělena tvarovka v podobě víčka (4), která uzavře vedlejší trasu. Délku laděné odbočky lze měnit zkrácením trubky (3) ve slepé větvi. Změna potrubí je nevratná, proto je potřeba měřit od největší požadované délky a postupně zkracovat až na nejmenší. Tento postup je časově náročný, protože před každou změnou délky odbočky je potřeba potrubí obrábět. Dalším omezením návrhu je minimální délka slepé větve ( $L$ ), která je daná rozměry hlavního potrubí, mezikusu a víčka. Zakótovaná délka  $L$  je proměnná a lze ji do určité míry měnit obráběním. Délka laděné odbočky není po celém průřezu konstantní z důvodu zakřivení potrubí. Na bokorysu je zobrazena změna od nejdelší ( $L_{max}$ ) po nejmenší ( $L_{min}$ ) délku rezonátoru. Průměr ( $\phi d$ ) spolu s délkou ( $L$ ) definuje prostor laděné odbočky.

Druhý návrh je řešen připojením potrubí o větším průměru ( $\phi 90$ ), avšak stejné orientace jako hlavní trasa. Schematický náčrtek v řezu je znázorněn na obr. 3.2. Součást označená číslem (2) je připojena k hlavnímu potrubí (1) napevno. Druhá část stejného průměru (4) je naopak pevně spojena s vnějším potrubím (3). Prostor laděné odbočky je označený číslem 5. Délka odbočky, značená kótou  $L$ , je nastavitelná vzájemným posunem obou popsaných celků. Pohyb je naznačený modrou oboustrannou šipkou. Mezera na vstupu do laděné odbočky je označená rozměrem  $w$  a lze ji také nastavit. Ovlivňuje se posunutím konců hlavního potrubí. Při měření by však zůstala konstantní a nastavovala by se pouze délka  $L$ . Odbočka je charakterizována mezikruhovým průřezem, který je daný

### 3.1. NÁVRH A POPIS MĚŘICÍ TRATĚ

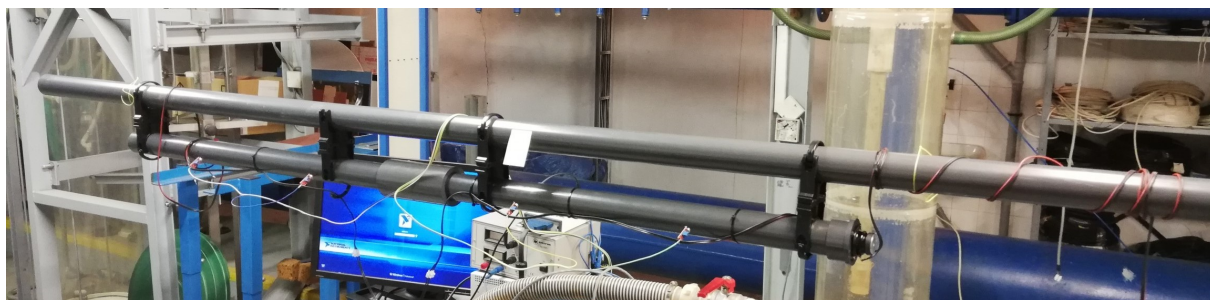


Obrázek 3.3: Schéma druhého návrhu laděné odbočky

použitím normovaných součástí. Z tohoto důvodu radiální rozměr dutiny lze měnit pouze po předepsaných částech (zakoupení potrubí o různé tloušťce), příp. obráběním.

Z předložených návrhů byl vybrán druhý koncept. Mezi hlavní důvody výběru patří jednodušší výroba a nastavitelnost laděné odbočky bez nutnosti nevratného oddělování materiálu. Co se týká celkových rozměrů soustavy, jedná se o kompaktnější řešení. To je důležitý faktor při řešení reálných úkolů, kdy není vhodné, aby soustava zasahovala příliš do prostoru.

Výsledná varianta byla vyrobena, sestavena a byly na ni provedeny experimenty. Fotografie realizace celé soustavy včetně vybrané varianty laděné odbočky je zobrazena na obr. 3.4. Z obrázku lze vidět, že odbočka je nevýrazná a její radiální rozměry jsou řádově srovnatelné s průměrem tratě.

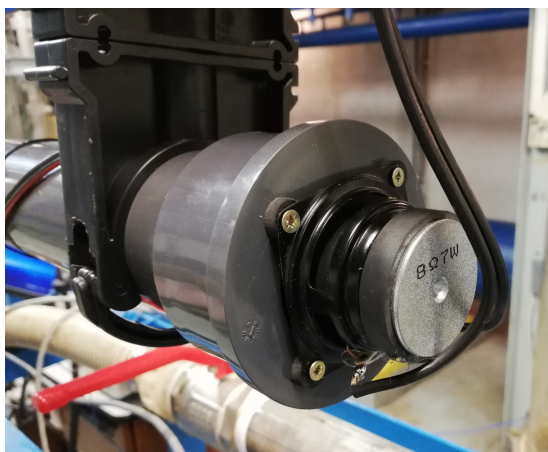


Obrázek 3.4: Realizace měřicí tratě.

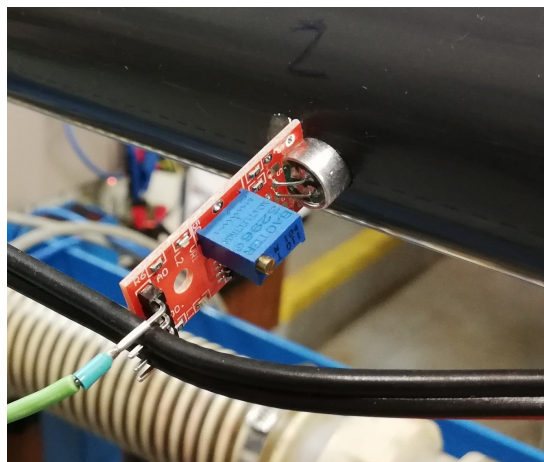
natelné s průměrem tratě.

Všechna měření byla provedena v hydraulické laboratoři na odboru fluidního inženýrství Victora Kaplana, VUT v Brně.

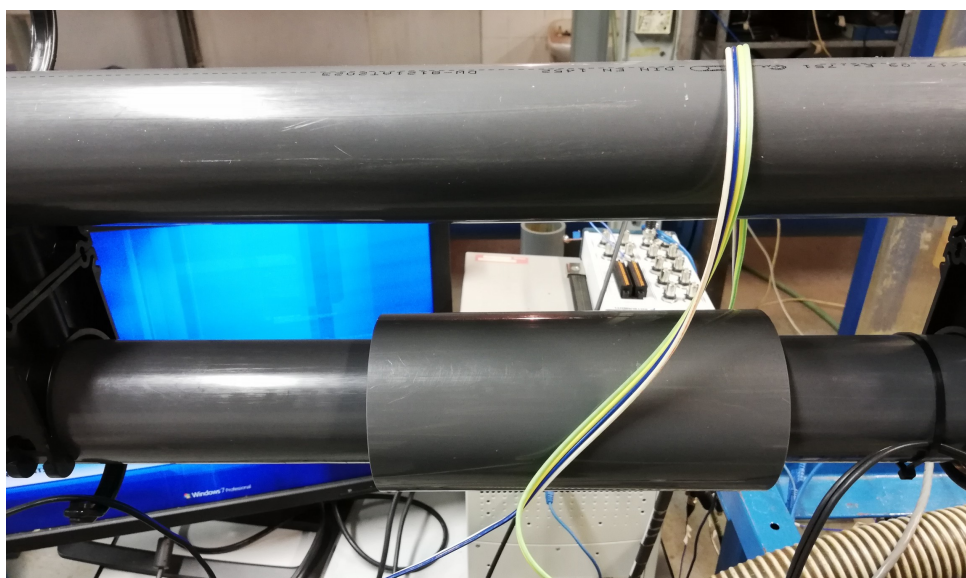
Původní potrubí bez laděné odbočky spolu s reproduktorem (obr. 3.5) a čtyřmi mikrofony (obr. 3.6) bylo zavěšeno na obou koncích na provázku. Po přidání odbočky, která je zobrazena na obr. 3.7, se střední část mírně propadla. Z důvodů zachování přímosti



Obrázek 3.5: Připevnění reproduktoru k měřicí trati.



Obrázek 3.6: Ukázka jednoho mikrofonu použitého při měření.



Obrázek 3.7: Realizace laděné odbočky.

a stability bylo provedeno zpevnění, které se realizovalo připojením paralelního potrubí. Spojení byla vytvořena na 4 místech a lze je vidět na obr. 3.4.

Celá soustava je opět zavěšena na provázku. Nikoli za hlavní potrubí, jak tomu bylo zpočátku, ale za paralelní pomocnou větev.

## 3.2. Způsob buzení soustavy a použité přístroje

Do potrubí byly vyvrtány díry, do kterých byly vloženy a přichyceny 4 mikrofony s označením Eses 1467272055, které byly napájeny napětím 5 V z laboratorního zdroje Statron - typ: 224.1. Soustava byla zpočátku buzena pomocí reproduktoru sinusovým signálem tvořeným v generátoru Tesla BK 124. Tento signál byl veden do zesilovače MMF LV 1021, pomocí něhož byl cca 10× zesílen. Data z mikrofónů byla zapisována díky speciálnímu modulu NI PXIe-4492.

### 3.2. ZPŮSOB BUZENÍ SOUSTAVY A POUŽITÉ PŘÍSTROJE

Měření bylo provedeno dvěma přejedy přes jednotlivé frekvence. Na generátoru byl nastaven sinusový průběh a potřebné frekvenční pásmo. Intervaly vypadaly následovně:  $< 100 \text{ Hz}; 1 \text{ kHz} > \cup < 1 \text{ kHz}; 10 \text{ kHz} >$ . Při změně intervalu bylo nutné manuální přepnutí pomocí tlačítka na generátoru signálu. Frekvence při přejedu byly ručně měněny pomocí kolečka (regulačního potenciometru) na přístroji. Data z mikrofónů byla zaznamenána skrze prostředí LabView se vzorkovací frekvencí 32 kHz. Jeden záznam trval celkově 30 s. I přes snahu spojitého, plynulého a rovnoměrného průběhu byla data značně nestejnoměrně rozdělená. To bylo pravděpodobně způsobeno do značné míry lidskou nepřesností, ale také měřením neustáleného stavu. Jelikož se tento způsob buzení ukázal jako nevhodný, vyvstala otázka, jakým způsobem soustavu budit přístě.

Jednou z diskutovaných možností bylo využití bílého šumu. Nakonec bylo realizováno jiné řešení – použití sinusového průběhu ovládaného pomocí počítače. Nastavené frekvence jsou díky tomu velmi přesné. Soustava byla zapojena stejným způsobem jako při prvním měření, ale generátor sinusového průběhu byl nahrazen univerzální kartou NI PXIe-6356. Jelikož by bylo časově velmi náročné měřit signál pro všechny frekvence, byl zvolen krok mezi jednotlivými měřeními 20 Hz. Měření probíhalo od 100 do 8000 Hz. Vzorkovací frekvence byla navýšena na 108 kHz. Před měřením každého dvou sekundového záznamu byl vymezen určitý čas na ustálení stavu. Samotné buzení bylo provedeno reproduktorem. Hodnoty z mikrofónů byly exportovány ve formě datových souborů s koncovkou *-.lvm*. V souboru jsou zaznamenány podmínky měření (datum a čas, vzorkovací frekvence, počet vzorků, ...), časový okamžik měření jednotlivých bodů a hodnoty elektrického napětí z mikrofónů. Výchyly na mikrofónech jsou reprezentovány napětím, které je závislé na akustickém tlaku.

Měření byla provedena za relativně konstantní hodnoty teploty okolí –  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a *relativní vzdušné vlhkosti* –  $\phi = 60 \text{ } \%$ . Změna teploty i vlhkosti se v průběhu měření může lišit maximálně několika jednotkami, proto vliv fluktuací veličin je možné v tomto případě považovat za nepodstatný.

#### Seznam použitých přístrojů

- zvukový a vibrační modul NI PXIe-4492
- univerzální karta NI PXIe-6356
- laboratorní zdroj Statron, Typ 224.1
- zesilovač MMF LV 1021
- generátor RC-Tesla BK 124
- 4×mikrofon Eses1467272055
- reproduktor s parametry  $8\Omega 7W$

## 4. Metoda zpracování dat

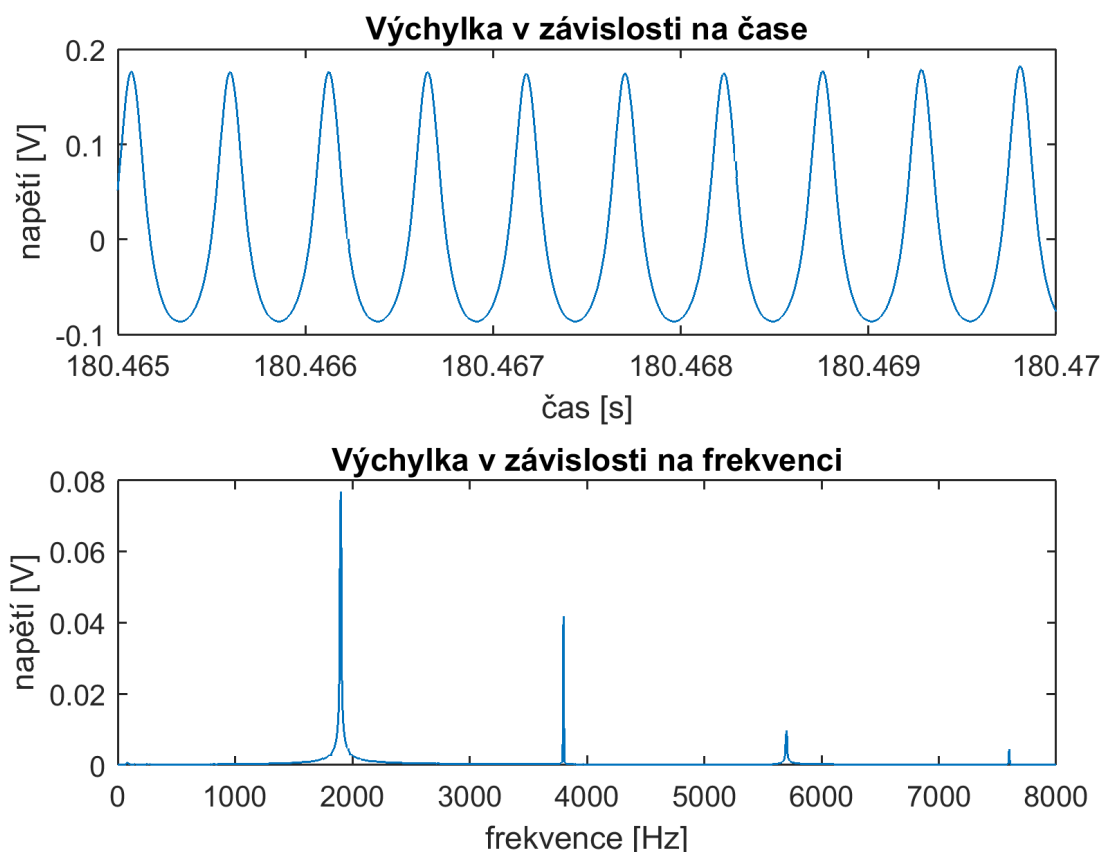
Vhodný způsob zpracování dat je nedílnou součástí každého experimentu. Nevhodně zvolená metoda může chybně interpretovat výsledky, zakrýt charakteristické vlastnosti sledované veličiny nebo dokonce původní data zcela znehodnotit. Hlavní metodou této práce bylo použití Fourierovy transformace k nalezení kmitočtových spekter.

Data z experimentu byla zaznamenána v prostředí LabView. Jednalo se o soubory, které obsahovaly několik desítek či stovek tisíc pozorování. Zpracování dat probíhalo v programu Matlab.

Ze změřených dat je možné přímo zobrazit originální oblast a některé charakteristiky signálu. Ty však neposkytují potřebné informace.

Před provedením transformace byla zvažována konvoluce vybraného časového obdélníkového okna (analyzovaných dat) s nějakým váhovacím okénkem. Tato operace však nebyla nakonec provedena.

Pro převod do spektrální oblasti byla využita matlabovská funkce *fft*. Jedná se o rychlou Fourierovu transformaci. Na obr. 4.1 nahoře lze vidět jeden úsek z analyzovaného sig-



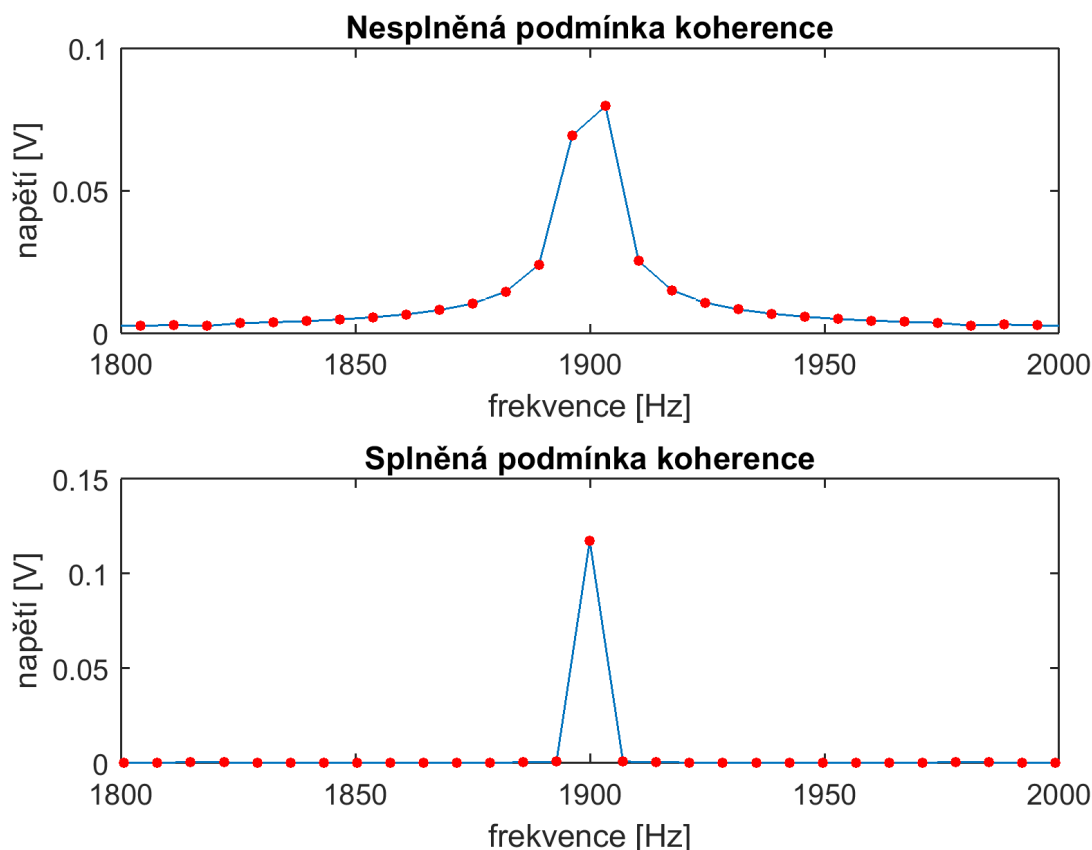
Obrázek 4.1: Časová a spektrální oblast signálu.

nálu v časové oblasti. Pro názornost je zobrazeno pouze několik vlnových délek. V druhé části tohoto obrázku je znázorněno frekvenční spektrum. Vypočtená hodnota první harmonické frekvence signálu je  $U \approx 0.077$  V s kmitočtem  $f \approx 1903,3$  Hz. U této složky spektra je možné vidět, že okolní hodnoty nejsou blízké nule, jak je tomu u druhé složky. Tento jev je nežádoucí a vzniká při nevhodné volbě počtu vzorků analyzovaného úseku.



Okolní hodnoty „odebírají“ energii příslušné maximální výchylce a výsledná hodnota je potom o něco menší. Vhodnou volbu obdélníkového okna popisuje podmínka koherence.

Aby byla splněná podmínka koherence, musí platit, že počet analyzovaných vzorků popisuje právě  $m$  period, kde  $m$  je přirozené číslo [38]. Největší nepřesnost vzniká, jestliže bod maximální výchylky není zastoupen a místo něho jsou nalezeny dva body, které jsou stejně vzdálené od hledaného místa a mají hodnotu přibližně  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  násobek maximální výchylky. Podobná situace je zobrazena na obr. 4.2. Ze stejného záznamu jako je zakreslen

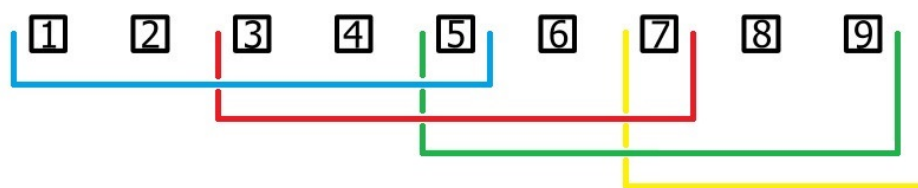


Obrázek 4.2: Podmínka koherence.

na obr. 4.1 dole, byla přiblížena oblast 1. harmonické frekvence. Ačkoli se zpočátku zdálo, že vrchol signálu je tvořen pouze jednou hodnotou, bližší zobrazení kritického místa prokázalo opak (obr. 4.2 nahoře). Při postupném snižování délky záznamu byla nalezena nejbližší hodnota počtu vzorků vyhovující podmínce kohorence. Pro porovnání jsou nové hodnoty následující:  $U = 0,117$  V a  $f = 1900,0$  Hz. Hodnota amplitudy se zpřesnila o 32 % a frekvence o 3,3 Hz.

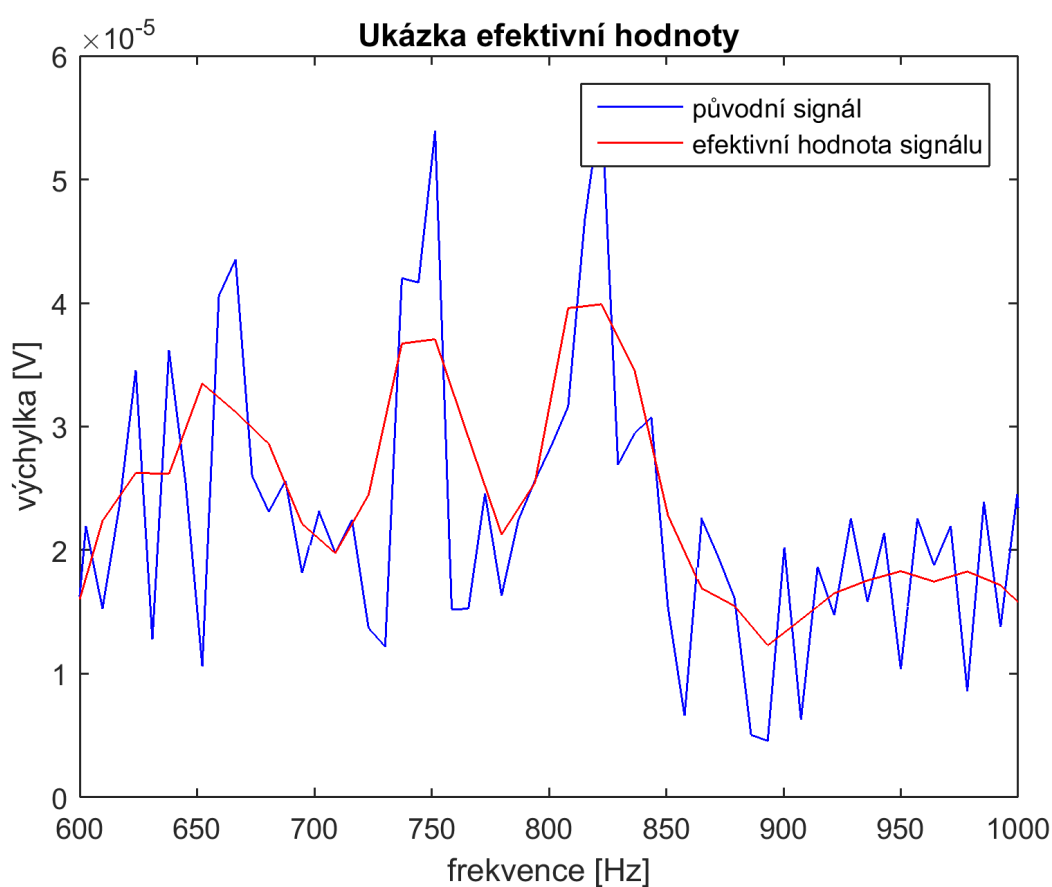
Podmínka koherence byla aplikována na všechny hledané hodnoty, díky čemuž se výchylky zpřesnily až o 36 %.

Jelikož jednotlivé hodnoty byly značně rozházené, pro vyhlazení výsledných průběhů byly použity efektivní hodnoty. Ty byly počítány vždy z pěti bodů (šířka intervalu = 100 Hz) s tím, že posun intervalů je vždy o 2 body (dva vedlejší intervaly mají vždy 3 hodnoty společné). Grafické znázornění lze vidět na obr. 4.3. Čtverečky označují body frekvenčního spektra a jednotlivé barvy značí použité intervaly. Kmitočet připadající bodu intervalu je vypočítán z průměrné hodnoty pěti bodů. K určení efektivní hodnoty je použit vztah (2.18). Délka intervalů a překrytí ovlivňuje zobrazení výsledků. Lze vidět,



Obrázek 4.3: Interval výběru při výpočtu efektivních hodnot.

že při použití této konfigurace se některé hodnoty objeví vícekrát než jiné – hodnota 5 se nachází ve třech intervalech, kdežto hodnota 6 pouze ve dvou. Ukázka „vyhlazení“ průběhu použitím efektivních hodnot je na obrázku 4.4. Je zobrazena pouze část hodnot z celého záznamu.

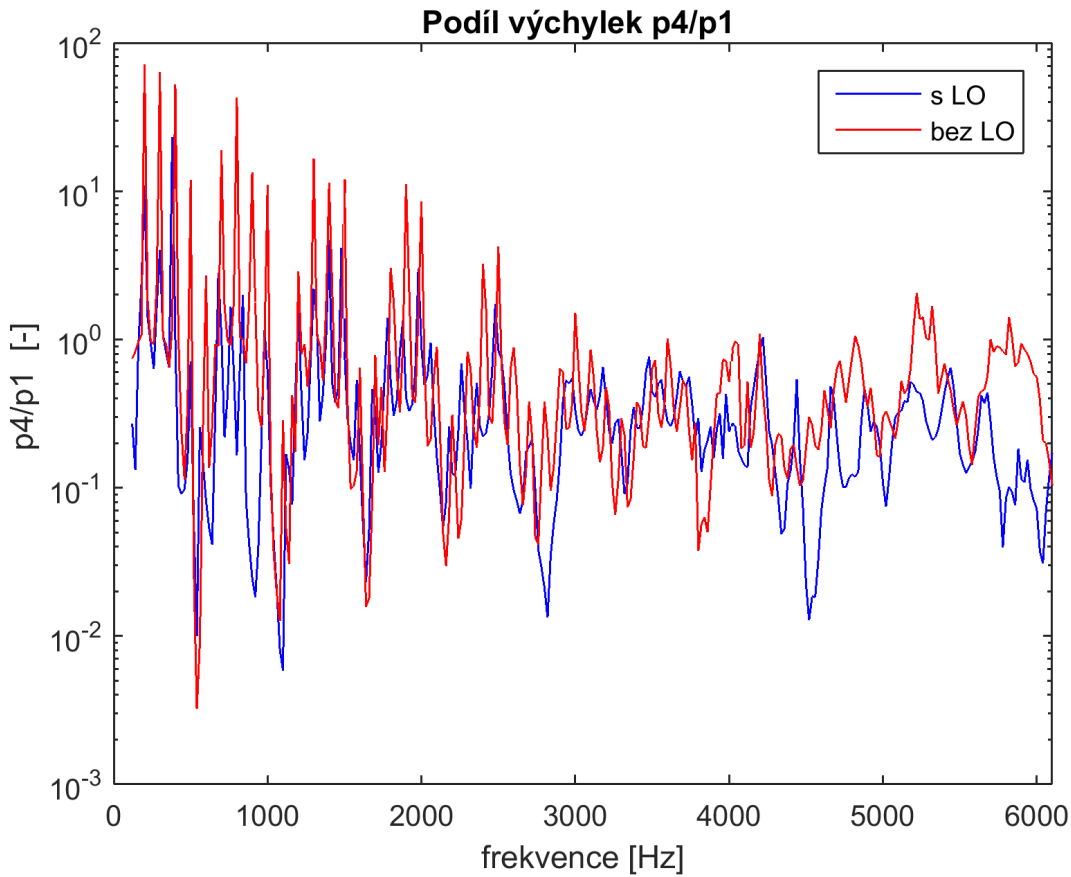


Obrázek 4.4: Ukázka použití efektivních hodnot.

## 5. Výsledky měření a diskuze

Byly zvoleny dvě varianty podmínek při měření. Hlavní potrubí bylo měřeno s volným nebo uzavřeným koncem. Realizace byla provedena přiděláním víčka na opačnou stranu než je umístěn mikrofon.

Nejdříve byl naměřen útlum systému bez laděné odbočky pro obě varianty. Poté s laděnou odbočkou o délkách  $L = 12, 17, 23, 32, 42, 62$  a  $82 \text{ mm}$ . Prvními zobrazenými průběhy jsou poměry výchylek čtvrtého a prvního snímače –  $p_4$  ku  $p_1$ . Hodnoty nesymbolizují akustický tlak, ale elektrické napětí, které přímo závisí na akustickém tlaku. Červenou barvou jsou zobrazena data bez laděné odbočky a modrou s laděnou odbočkou. Graf pro délku  $L = 82 \text{ mm}$  s otevřeným koncem lze vidět na obr. 5.1. Na svislé ose je použito logarit-



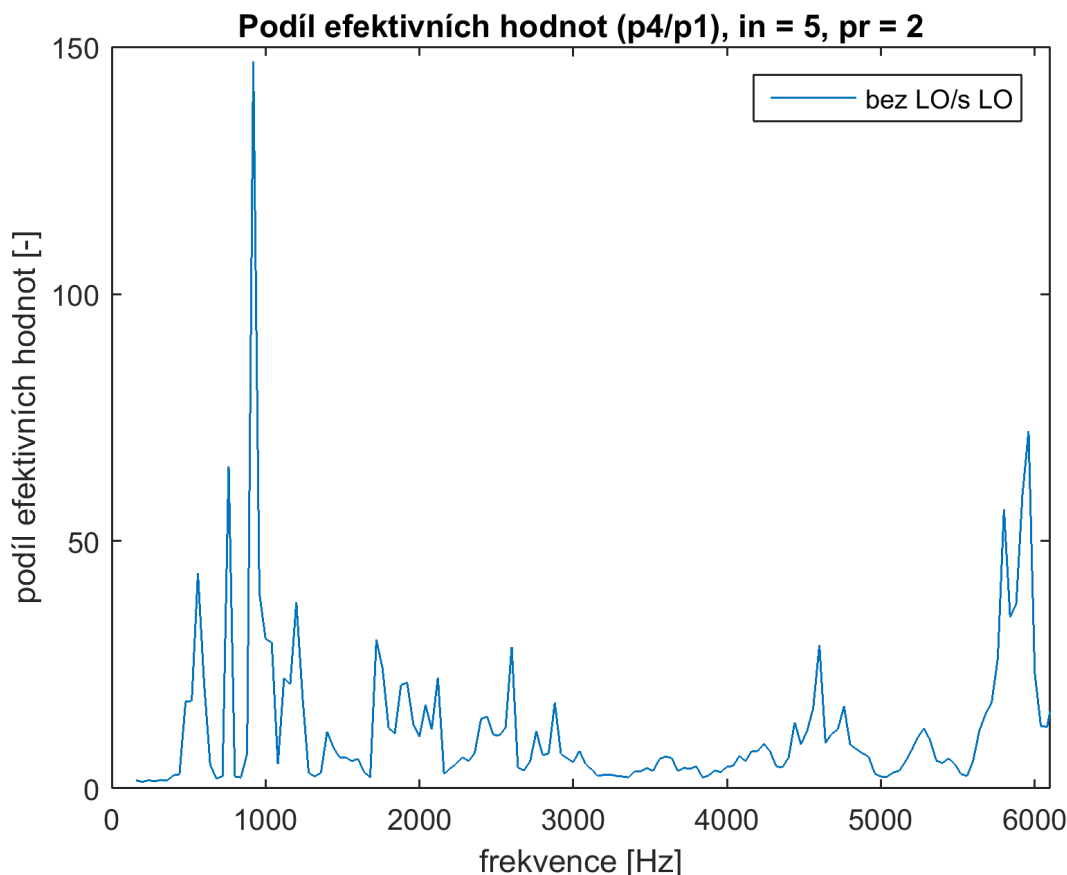
Obrázek 5.1: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82 \text{ mm}$  s otevřeným koncem.

mické měřítko. Jelikož se jedná o poměr, jde o bezrozměrnou veličinu. Na vodorovné ose je interval frekvencí od 100 do 6000 Hz, který odpovídá původně zvolenému kmitočtovému pásmu. Odbočka je dle vztahu (2.20) naladěná na frekvenci  $f_r = 1047,3 \text{ Hz}$ . Výrazný útlum je však viditelný již při hodnotě  $920 \text{ Hz}$ . Útlumy jsou nejvýraznější na místech, kde se modrý graf nejvíce propadne v porovnání s červeným grafem. Vždy musí být porovnávány hodnoty nad sebou – pro stejné frekvence. Další (násobné) útlumy jsou viditelné na frekvencích 2760 a 4600 Hz, což odpovídá trojnásobku (popř. pětinasobku) frekvence skutečného naladění.

Jelikož je graf 5.1 nepřehledný a skutečný útlum se z něj určuje obtížně, byl pro názornost vytvořen graf za použití efektivních hodnot. Efektivní hodnoty byly vypočítány jak



pro hodnoty s odbočkou, tak i pro hodnoty bez odbočky (podrobněji rozepsáno v kapitole 4). Nalezené body odpovídající frekvence byly vůči sobě porovnány. Graficky je útlum znázorněn na obr. 5.2. V grafu jsou zapsané dva parametry  $a$  to  $in$  a  $pr$ . Tyto hodnoty



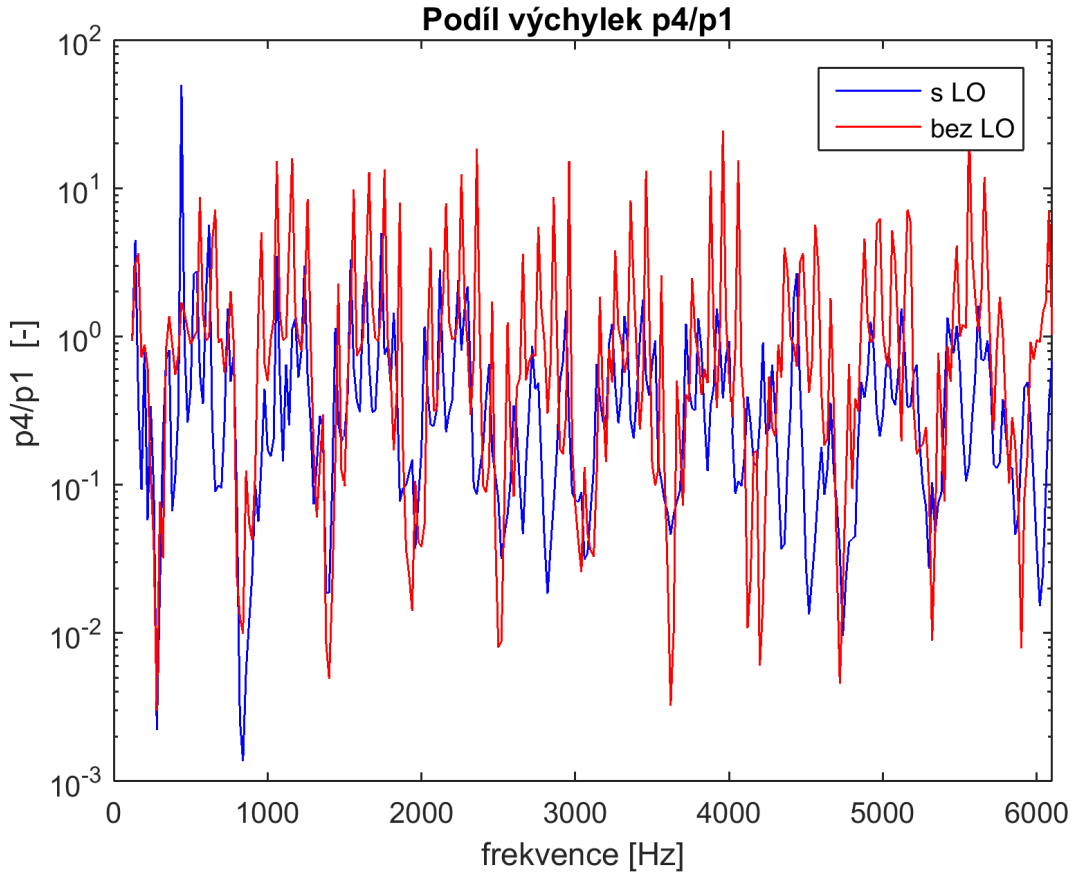
Obrázek 5.2: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82$  mm s otevřeným koncem.

jsou stejné i pro ostatní případy. Parametr  $in$  popisuje délku intervalu zvolenou při výpočtu efektivních hodnot – v tomto případě 5 hodnot odpovídá pásmu o šířce 100 Hz. Druhý parametr  $pr$  značí, jak rychle se interval posouvá. Při zvolené hodnotě 2 to znamená také to, že z celkového počtu vzorků, se vytvoří graf o přibližně polovičním množství hodnot. Výsledné frekvenční rozlišení se sníží, avšak průběh se vyhladí.

V grafu 5.2 je zobrazen pouze jeden průběh. Jedná se o podíl efektivních hodnot bez odbočky vůči odpovídajícím hodnotám s odbočkou. Svislá osa již není logaritmická a znázorňuje, kolikrát se amplituda signálu utlumila v dané frekvenci. Čím větší je hodnota na svislé ose, tím vyšší je útlum. Naopak pokud křivka klesne pod hodnotu 1, znamená to, že byl signál zesílen oproti stavu bez odbočky.

V grafu je nejvíce patrný útlum kolem frekvence skutečného naladění  $f_r = 920$  Hz, jak již bylo zřejmé z obrázku 5.1. Vlivem použití intervalů a zhoršením frekvenční rozlišitelnosti byl vrchol mírně posunut k vyšším kmitočtům. Násobné frekvence jsou zde v porovnání se zbytkem grafu málo výrazné. To je do značné míry způsobeno maximální hodnotou frekvence naladění – je přibližně o řád vyšší než zbytek hodnot. Druhý nejvýraznější útlum lze pozorovat v oblasti kolem  $f = 5900$  Hz. Tento útlum je však pravděpodobně způsoben jiným faktorem. Může se jednat o útlum vlivem přeladění systému, když byl k soustavě přidán rezonátor, avšak skutečný důvod není jasný.

Pro stejnou délku laděné odbočky –  $L = 82 \text{ mm}$ , avšak s uzavřeným koncem potrubí, je znázorněn podíl výchylek na obr. 5.3. Při pohledu na graf, je opět patrné, že nalezení



Obrázek 5.3: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82 \text{ mm}$  s uzavřeným koncem.

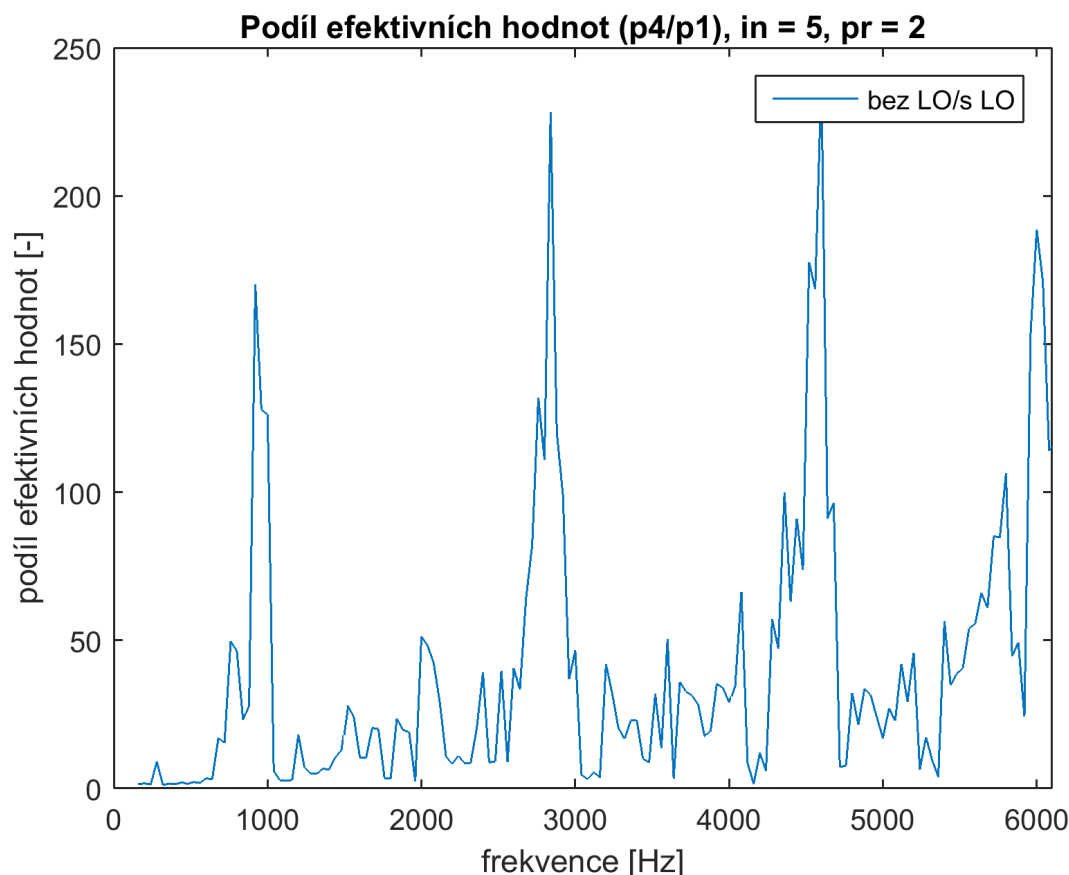
místa největšího útlumu je velice obtížné. Jsou relativně dobře viditelné útlumy na násobných frekvencích (cca 2760 a 4600 Hz), ale místo naladění tak patrné není. K tomuto účelu poslouží graf efektivních hodnot, který je možné vidět na obr. 5.4. Z grafu poměrů efektivních hodnot je již patrné místo naladění rezonátoru.

V některých případech může použití intervalů s efektivními hodnotami zvýraznit globální maximum a zároveň při tom rozmazat méně výraznější vrcholy. V této práci byly použity stejné parametry pro všechny měřené délky laděné odbočky, i když by bylo vhodné jednotlivé parametry *in* a *pr* upravit pro konkrétní případy. Nevhodnost intervalu je nejvíce patrná u krátkých délek.

Zbylé grafy podílu výchylek napětí a efektivních hodnot napětí v závislosti na frekvenci jsou pro navržené délky obsaženy v příloze na straně 54. Nejdříve jsou zobrazeny případy pro otevřený konec, poté pro uzavřený konec. Grafy jsou označeny dle délky laděné dobočky ( $L$ ).

Z grafů byly zjištěny přibližné frekvence naladění v závislosti na zvolené délce odbočky. Zároveň byly vypočítány teoretické hodnoty z rovnice (2.20). K určení rychlosti zvuku ve vzduchu byla použita rovnice (2.4). Za teplotu vzduchu byla dosazena hodnota  $t = 20^\circ\text{C}$ .

$$c = 331,6 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273,15}} = 331,6 \cdot \sqrt{1 + \frac{20}{273,15}} \approx 343,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obrázek 5.4: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82$  mm s uzavřeným koncem.

Vypočtené teoretické hodnoty frekvence naladění byly vypočítány se zmíněnou rychlostí  $c = 343,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Získaná data jsou zobrazena v tabulce 5.1. První sloupec obsahuje zvo-

Tabulka 5.1: Data vlastních frekvencí v závislosti na délce odbočky.

délka odbočky [mm]	teoretická frekv. [Hz]	f naměřená - ok [Hz]	f naměřená - uk [Hz]
82	1047,3	920	920
62	1385,1	1200	1160
42	2044,6	1720	1530
32	2683,6	1920	2000
23	3733,7	2600	2680
17	5051,5	3080	3200
12	7156,3	3600	3600

lené délky odbočky v milimetrech. Ve druhém sloupečku jsou teoretické hodnoty frekvence naladění. Třetí a čtvrtý sloupec obsahuje přibližně určené frekvence naladění pro otevřený a uzavřený konec. Určování konkrétní frekvence bylo místy velmi nejednoznačné a obtížné. Byla zvolena hodnota, u které byl pozorován největší útlum. Pokud těchto hodnot bylo více a jejich amplitudy byly řádově stejné, byla zvolena extrémní hodnota nacházející se uprostřed oblasti největšího útlumu. Výše popsany průběh byl nejvíce patrný u vyšších frekvencí.

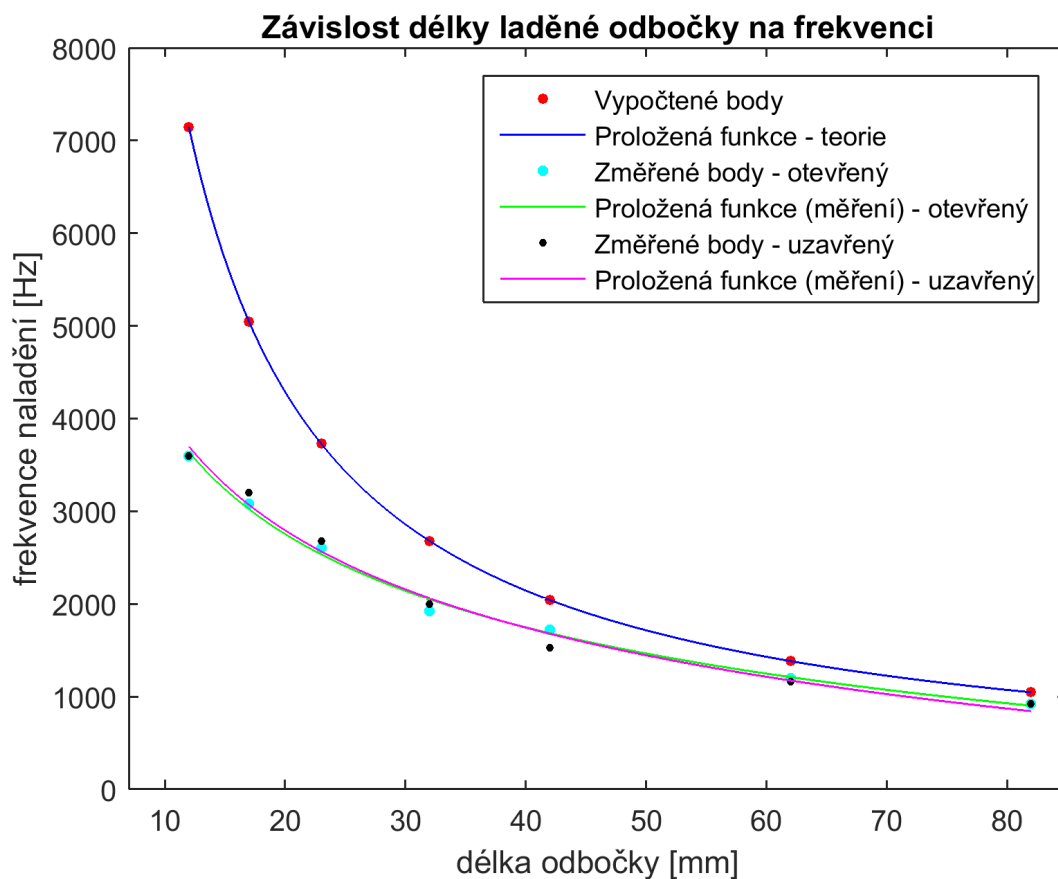
U většiny grafů z přílohy je patrné, že čím je frekvence naladění vyšší, tím je větší šířka tlumeného kmitočtového pásma. Na druhou stranu maximální pozorovaný útlum se zmenšuje. V případě pro  $L = 82 \text{ mm}$  je útlum na frekvenci naladění řádově  $10^2$  u délky  $L = 23 \text{ mm}$  již jen  $10^1$ .

Data z tabulky 5.1 byla vynesena do grafu a proložena křivkami. K aproximaci dat byla použita matlabovská funkce *fit*. Za hledanou závislost byla zvolena mocninná funkce ve tvaru

$$f_r = a \cdot L^b + c. \quad (5.1)$$

$f_r$       frekvence naladění [Hz]  
 $L$       délka laděné odbočky [mm]

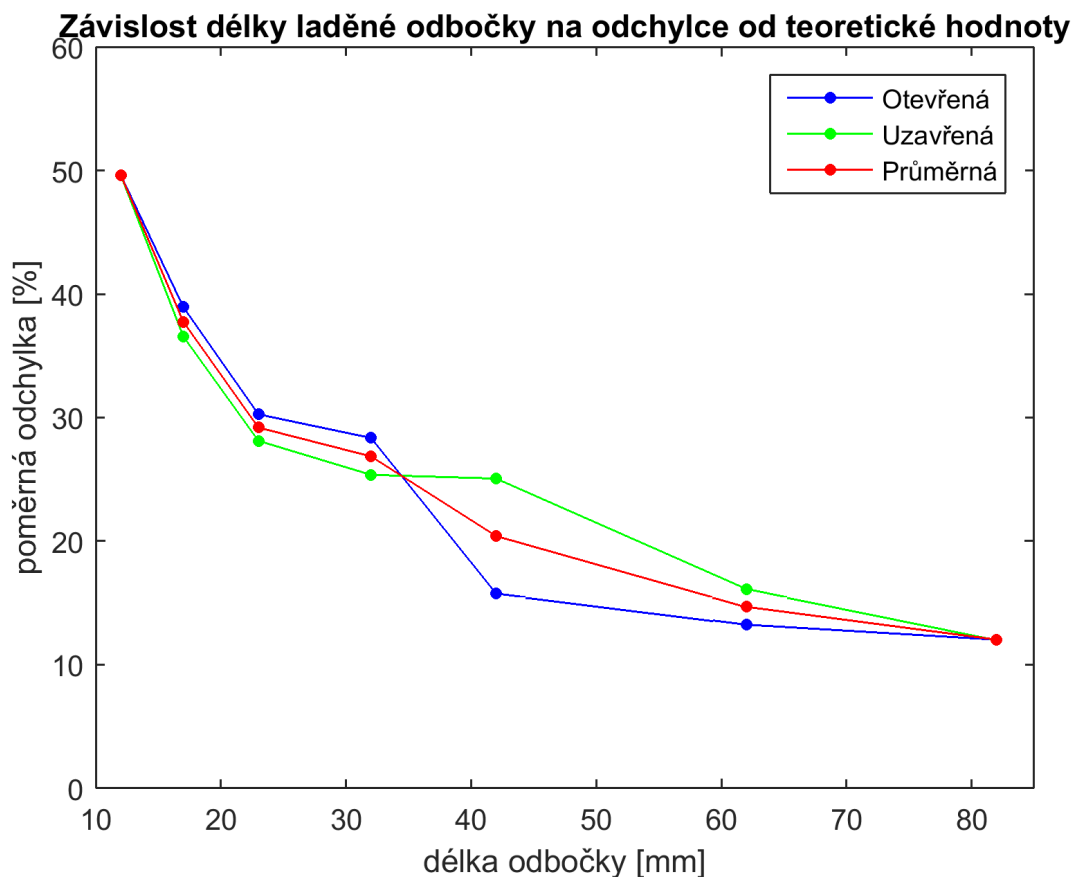
Funkce byla zvolena v návaznosti na rovnici (2.20), kde je patrná hyperbolická závislost. Grafickou podobu závislosti frekvence naladění na délce odbočky lze vidět na obr. 5.5. Tečky symbolizují údaje z tabulky zakreslené do grafu. Spojité křivky jsou mocninné



Obrázek 5.5: Znázornění a aproximace závislosti frekvence naladění na délce odbočky.

funkce aproximované zjištěnými body – neprocházejí konkrétními body, ale s ohledem na nejmenší střední kvadratickou odchylku je aproximují. Modrá křivka značí teoretickou závislost. Zbylé dvě (zelená a purpurová) jsou sestavené na základě naměřených hodnot pro otevřený a uzavřený konec. Rozdíly mezi oběma variantami jsou minimální a křivky se v jedné části dokonce překrývají.

Pro větší měřené délky odbočky (82 mm) se experimentálně zjištěná frekvence příliš neliší od teoretické. Čím se ale délka rezonátoru zmenšuje, tím je naměřená hodnota kmitočtu vzdálenější od předpokládané hodnoty. U nejkratší měřené délky (12 mm) je skutečná frekvence naladění téměř poloviční. Na obr. 5.6. je znázorněna poměrná odchylka.



Obrázek 5.6: Odchylka naměřených a teoretických dat.

Ze sto procent byl odečten poměr změřené hodnoty frekvence vůči teoretické pro jednotlivé délky odbočky. Výsledné body popisují, o kolik procent se liší naměřená hodnota vůči teoretické. Červené body značí průměrné hodnoty mezi otevřeným (modré body) a uzavřeným (zelené body) koncem.

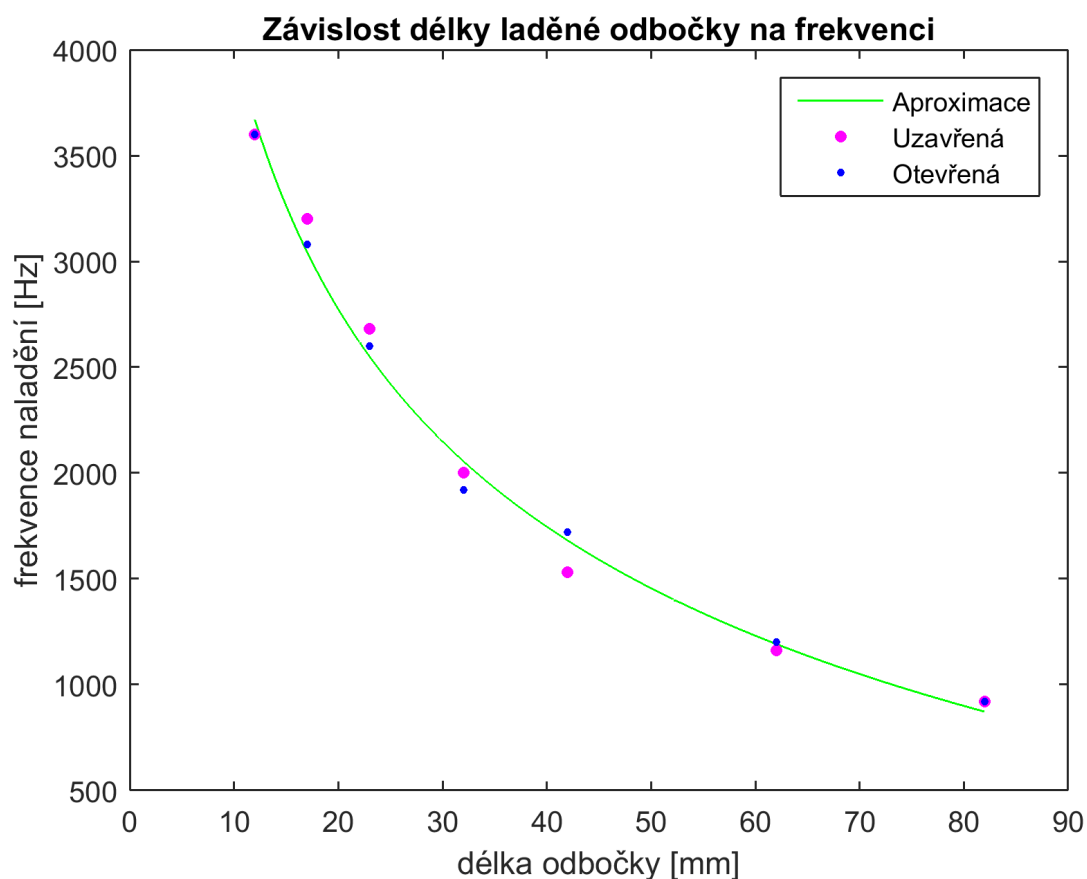
Rovnice (5.2) popisuje vztah mezi délkou laděné odbočky a frekvencí naladění. Jedná se o určitý kompromis mezi otevřeným a uzavřeným koncem (purpurovou a zelenou křivkou zobrazenou na obr. 5.5).

$$f_r = 13483 \cdot L^{-0.28} - 3064 \quad (5.2)$$

$L$  délka laděné odbočky [mm]

Vztah popisuje chování pro interval délek  $L \in < 12, 82 > \text{ mm}$ . Výpočet pomocí rovnice (5.1) nemusí být pro jinou soustavu přesný a je založen na základě jen několika málo hodnot. Případná extrapolace křivky může vést k chybným, dokonce fatálním výsledkům, které nekorespondují s realitou.

Grafické znázornění aproximace spolu s proloženými daty lze vidět na obr. 5.7.



Obrázek 5.7: Grafické znázornění vztahu (5.2).

Je příhodné podtknout, že grafy uvedené v této práci mají za úkol zviditelnit hlavně útlum. Místa, která měla opačný vliv a signál v nich byl zesílen, jsou téměř nepopsaná a lze je částečně vidět jen na grafech s přímým poměrem. Je proto nutná obezřetnost při aplikaci a reálném použití. Je-li laděná odbočka navržena nedbale, může být neúčinná, nebo dokonce i uškodit.

## 6. Závěr

Předkládaná práce je zaměřena na experimentální zjištění přenosu laděné odbočky pro velmi malé rozměry – délka rezonátoru je srovnatelně velká s průměrem potrubí, na který je odbočka připevněna. Bylo navrženo a vybráno konstrukční řešení laděné odbočky a změřen útlum pro 7 délek této varianty, každá s uzavřeným a otevřeným koncem hlavního potrubí. Výsledný přenos byl znázorněn graficky.

V první části práce byla provedena literární rešerše a uvedeny základní pojmy pro porozumění textu. Dále byly uvedeny základní poznatky z oblasti digitálního zpracování dat a možnosti tlumení hluku, zejména v potrubí. Hlavní metoda použitá v práci je Fourierova transformace, která slouží k převodu signálu z časové do spektrální oblasti.

Druhá část práce je zaměřena na samotný experiment. Byla navržena měřicí trať, která zahrnuje konstrukční provedení laděné odbočky. Buzení soustavy bylo provedeno reproduktorem, ve kterém byl pomocí univerzálního modulu generován sinusový průběh signálu o konkrétní frekvenci. Kmitočet se postupně zvyšoval po ekvidistantním kroku, díky čemuž byla změřena požadovaná množina frekvencí. Měření probíhalo v programu *LabView*, zpracování dat v programu *Matlab*. Ke zjištění spektra signálu byla použita rychlá Fourierova transformace, u které byla aplikována podmínka koherence. Tato podmínka zajistila upřesnění hledané frekvence a zamezení určité chyby při hledání amplitud vlivem použití vzorkovaného signálu. K vyhlazení průběhu útlumu byly použity efektivní hodnoty (rms) počítané přes intervaly frekvencí, které se vzájemně překrývaly.

Z naměřených a vypočtených útlumů byly přibližně určeny frekvence naladění – u vyšších kmitočtů bylo stanovení velmi nejednoznačné, proto se zde mohla vyskytnout určitá chyba. Zdá se, že útlum není již tak úzkopásmový jak vyplývá z principu fungování tlumiče. Se snižující se délkou laděné odbočky roste kmitočtové pásmo vykazující útlum. Jelikož se pásmo rozšiřuje, útlum ztrácí na intenzitě. Výsledky experimentu naznačují, že pro větší délky laděné odbočky se frekvence naladění blíží teoretické hodnotě. Pro menší rozměry rezonátoru tato teorie dle experimentu již neodpovídá – při snižování délky odbočky neroste frekvence naladění tak rychle, jak se očekávalo. Stále je patrná mocinná závislost, avšak s jinými koeficienty rovnice.

Pro případnou navazující práci by bylo vhodné provést měření na více místech a hlouběji prozkoumat oblast velmi krátkých délek rezonátoru. Při větším počtu hodnot lze požadovanou závislost určit přesněji. Další možností je tvorba matematického modelu a zjištění příčin odlišností naměřené závislosti od teoretické.

# Seznam použitých zdrojů

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [2] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Vyd. 2., V Akademickém nakl. CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- [3] BERANEK, Leo Leroy. *Snižování hluku*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [4] HORÁK, Karel. *Úvod do zpracování signálů* [online]. Brno [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: [http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/Lectures/01\\_Uvod\\_do\\_zpracovani\\_signalu.pdf](http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/Lectures/01_Uvod_do_zpracovani_signalu.pdf).
- [5] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Vznik lidského hlasu. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/188-vznik-lidskeho-hlasu>.
- [6] VEEN, Barry. Convolution of Signals: Why?. *Allsignalprocessing* [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://allsignalprocessing.com/convolution-of-signals-why/>.
- [7] ZAPLATÍLEK, Karel. *MATLAB®: začínáme se signály*. Brno: Tribun EU, 2015. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-263-0898-0.
- [8] *Acoustics* [online]. 2001 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/acoustics-noise-decibels-t\\_27.html](https://www.engineeringtoolbox.com/acoustics-noise-decibels-t_27.html).
- [9] NAVE, Carl R. Acoustics: Inverse Square Law, Sound. In: *HyperPhysics* [online]. Atlanta: Department of Physics and Astronomy [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Acoustic/invsqs.html>.
- [10] SMITH, Steven W. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists* [online]. Boston: Newnes, 2003 [cit. 2019-05-01]. ISBN 0-750674-44-X. Dostupné z: [books.google.cz](https://books.google.cz)
- [11] JOHNSON, John. Signal chain basics: Random jitter and phase noise. In: *EeNewsAnalog* [online]. 2011 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.eenewsanalog.com>.
- [12] BERG, Richard. Sound: Physics. *Encyclopaedia Britannica* [online]. Chicago, 1998 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/sound-physics/Noise>.
- [13] HLAVÁČ, Václav. *Fourierova transformace v 1D a 2D* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <http://people.ciirc.cvut.cz/hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/12FourierTxCz.pdf>.
- [14] KALÁB, Jan. *Spektrální analýza spojitých a diskrétních signálů* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: [https://kalabovi.org/pitel:isz:spektralni\\_analyza\\_spojitych\\_a\\_diskretnich\\_signalu](https://kalabovi.org/pitel:isz:spektralni_analyza_spojitych_a_diskretnich_signalu).



- [15] KLÍČ, Alois, Karel VOLKA a Miroslava DUBCOVÁ. *Fourierova transformace s příklady z infračervené spektroskopie* [online]. Vyd. 3. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2002 [cit. 2019-04-12]. ISBN 80-7080-478-5. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/mat/Pavel.Pokorny/students/ft/skripta/Four.pdf>.
- [16] ONDROUCH, Jan a Jiří PODEŠVA. *TECHNICKÉ KMITÁNÍ: Teorie a příklady k předmětu Technické kmitání* [online]. 2011, 179 s. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: [https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Podesva\\_kmitani.pdf](https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Podesva_kmitani.pdf).
- [17] PAVLÍČEK, Tomáš. *Segmentace pro časově-variantní systémy a jejich implementace*. Brno, 2014, 69 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miroslav Balík
- [18] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [19] SYROVÝ, Václav. Hudební signál a jeho analýza. *Živá hudba* [online]. 1983 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.ziva-hudba.info/article.php?id=234>.
- [20] ŠVEC, Martin. *Waveletové transformace*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Přírodovědecká fakulta, 2008. ISBN 978-80-7044-987-5.
- [21] TRUAX, Barry. *Handbook for Acoustic Ecology* [online]. Second Edition. 1999 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.sfu.ca/sonic-studio-webdav/handbook/index.html>.
- [22] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [23] (Diskrétní) Fourierova transformace [online]. 2003 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>.
- [24] MÁŠA, Pavel. *Analýza pnus, efektivní hodnota, činitel zkreslení, výkon neharmonického proudu: E02 - Přednáška 4* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo2/files/lectures/P4.pdf>
- [25] WEISSTEIN, Eric W. Root-Mean-Square. *Wolfram MathWorld* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html>
- [26] Difference between RMS and a moving RMS. In: *StackExchange: Signal processing* [online]. 2017 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://dsp.stackexchange.com/questions/42059/difference-between-rms-and-a-moving-rms>
- [27] VÍCH, Robert a Zdeněk SMÉKAL. *Číslíkové filtry*. Praha: Academia, 2000. Česká matice technická. ISBN 80-200-0761-X.
- [28] FUGAL, D. Lee. *Conceptual wavelets in digital signal processing: an in-depth, practical approach for the non-mathematician*. San Diego, Calif.: Space & Signals Technical Pub., 2009. ISBN 0982199457.

- [29] KOZICKÝ, Claudio. *Porovnání algoritmů pro rychlou Fourierovu transformaci*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ivan ŠIMEČEK.
- [30] MOKRÝ, Pavel. Moderní trendy v tlumení hluku a vibrací pomocí piezoelektrických materiálů. *Silnice-železnice: Materiály* [online]. KONSTRUKCE Media, 2019, 24.6.2009 [cit. 2019-04-08]. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/moderni-trendy-v-tlumeni-hluku-a-vibraci-pomoci-piezoelektrickych-materialu/>.
- [31] LIBERKO, Miloš. *Hluk v prostředí: Problematika a řešení*. [online]. 18. 1. 2004 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: [http://www.ceskyfocalpoint.cz/wp-content/uploads/2015/12/pupr\\_hluk\\_text.pdf](http://www.ceskyfocalpoint.cz/wp-content/uploads/2015/12/pupr_hluk_text.pdf).
- [32] ALLAM, Sabry. Low Noise Intake System Development for Turbocharged I.C. Engines Using Compact High Frequency Side Branch Resonators. *Advances in Powertrains and Automotives* [online]. 2015, 12-23 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.12691/apa-1-1-2. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/apa/1/1/2/>.
- [33] HABÁN, Vladimír. *Tlumení tlakových a průtokových pulzací: teze disertační práce*. V Brně: Vysoké učení technické, 2001. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. ISBN 80-214-1905-9.
- [34] JANDÁK, Vojtěch. *Aktivní snižování vyzařování zvuku z vibrujících těles*. Praha, 2012. Teze k disertační práci. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra fyziky. Vedoucí práce Ondřej Jiříček.
- [35] Reflection, diffusion and absorption of sound. *Build* [online]. Victoria: Connection Magazines [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://www.build.com.au/reflection-diffusion-and-absorption-sound>.
- [36] WOLFE, Joe. Helmholtz Resonance. *UNSW: Music Acoustics* [online]. 1997 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html>.
- [37] SENGPIEL, Eberhard. Damping of Air at High Frequencies (Dissipation). In: *Sengpielaudio* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-air.htm>.
- [38] ZUTH, Daniel. *Analýza nejistot ve vibrodiagnostice*. [s.l.], 2009. 95 s. , 5. VUT v Brně – Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí disertační práce Ing. František Vdoleček, CSc. .

# Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Název
$\Delta f$	$Hz$	krok na frekvenci
$\kappa$	—	Poissonova konstanta
$\lambda$	$m$	vlnová délka
$\omega$	$s^{-1}$	úhlová frekvence
$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$	hustota prostředí
$c$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost zvuku
$f$	$Hz$	frekvence
$f_r$	$Hz$	frekvence naladění
$f_{vz}$	$Hz$	vzorkovací frekvence
$h(n)$		odezva systému
$K$	$Pa$	modul objemové stlačitelnosti
$L$	$m$	délka hrdla
$L$	$m; mm$	délka odbočky
$L$	$dB$	hladina akustické veličiny
$N$	—	počet vzorků
$p(t)$	$Pa$	akustický tlak v závislosti na čase
$p_b$	$Pa$	tlak plynu
$p_c$	$Pa$	celkový tlak
$r$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná plynová konstanta
$S$	$m^2$	průřez hrdla
$s(i\omega)$		Fourierovo spektrum spojitého signálu
$s(t)$		časový průběh signálu
$t$	$^{\circ}C$	teplota
$t$	$s$	čas
$T$	$s$	perioda
$T$	$K$	termodynamická teplota
$T_0$	$s$	opakovací perioda
$T_{vz}$	$s$	interval vzorkování
$U$	$V$	elektrické napětí
$V$	$m^3$	objem
$x(n)$		vstupní signál
$y(n)$		odezva systému na vstupní signál

## Zkratka

$A/D$	analog to digital
$DFT$	discrete Fourier transform
$DSP$	digital signal processing
$FFT$	fast Fourier transform
$FT$	Fourier transform
$PVC - U$	Polyvinyl Chloride unplasticized
$rms$	root mean square

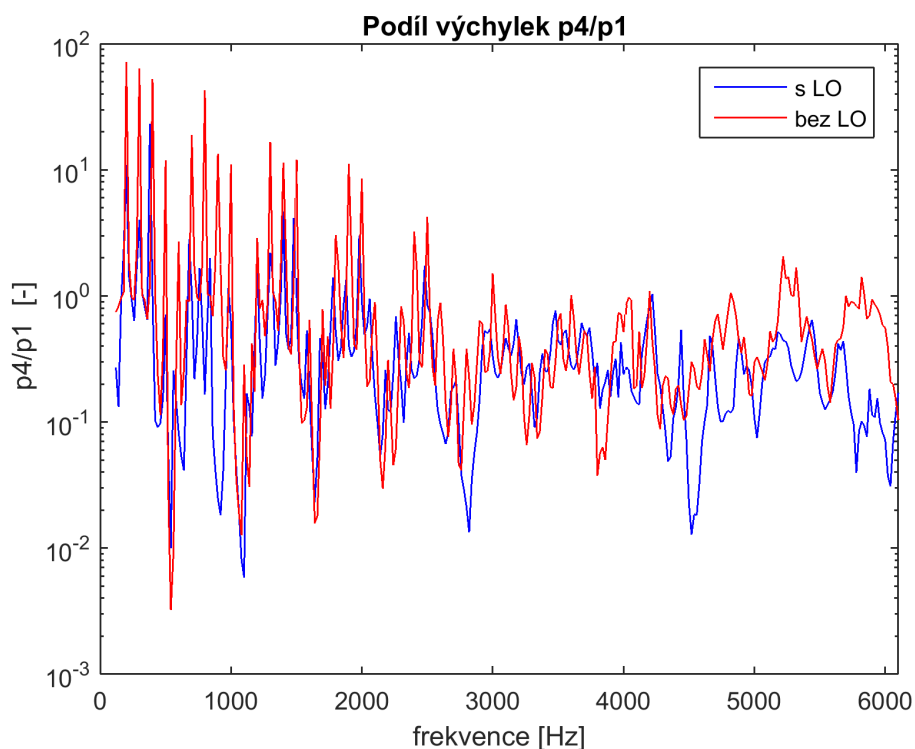
# Seznam příloh

<b>Přílohy</b>	<b>53</b>
<b>A Otevřený konec</b>	<b>54</b>
A.1 $L = 82$ . . . . .	54
A.2 $L = 62$ . . . . .	55
A.3 $L = 42$ . . . . .	56
A.4 $L = 32$ . . . . .	57
A.5 $L = 23$ . . . . .	58
A.6 $L = 17$ . . . . .	59
A.7 $L = 12$ . . . . .	60
<b>B Uzavřený konec</b>	<b>61</b>
B.1 $L = 82$ . . . . .	61
B.2 $L = 62$ . . . . .	62
B.3 $L = 42$ . . . . .	63
B.4 $L = 32$ . . . . .	64
B.5 $L = 23$ . . . . .	65
B.6 $L = 17$ . . . . .	66
B.7 $L = 12$ . . . . .	67
<b>C Zdrojový kód - Fourierova tranformace</b>	
<b>D Zdrojový kód - aproximace dat</b>	

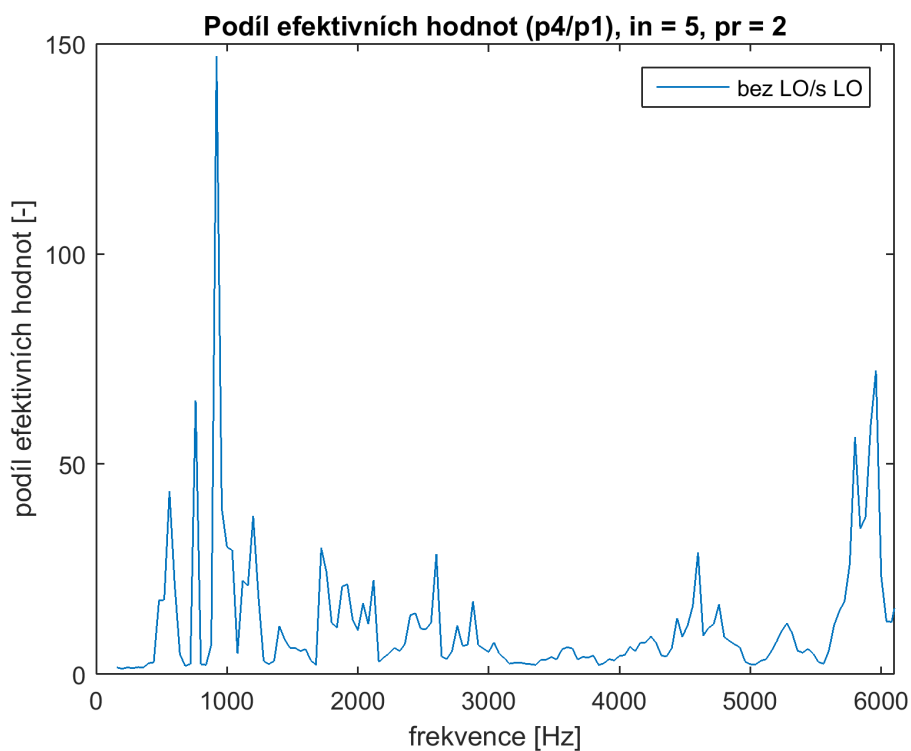
# Přílohy

# A. Otevřený konec

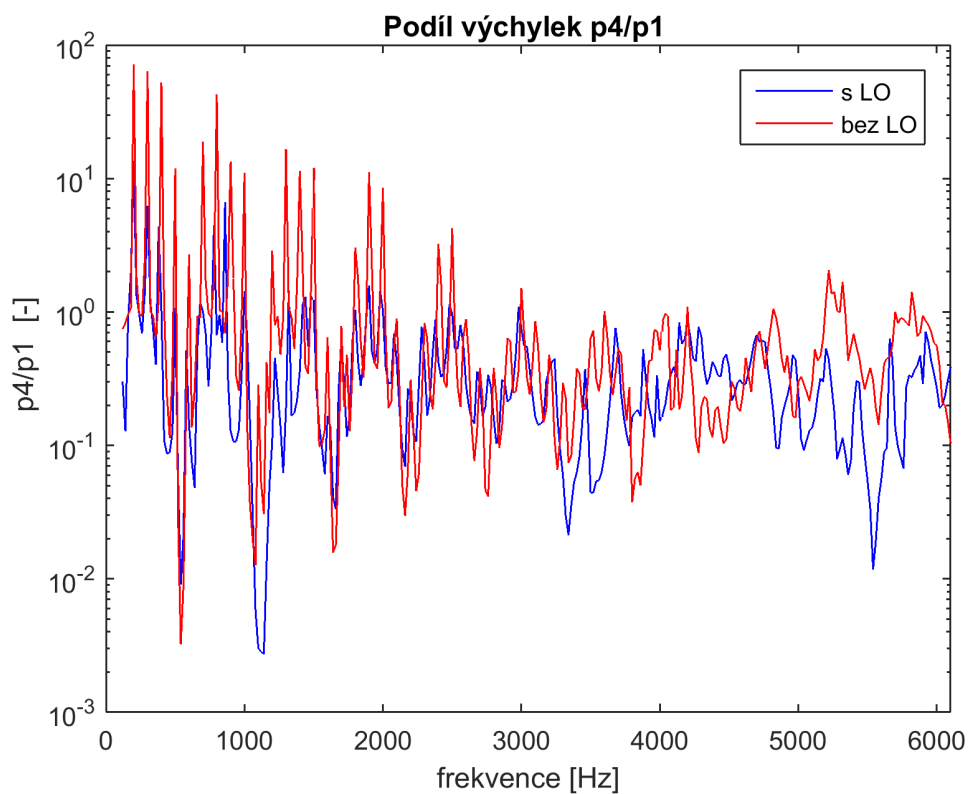
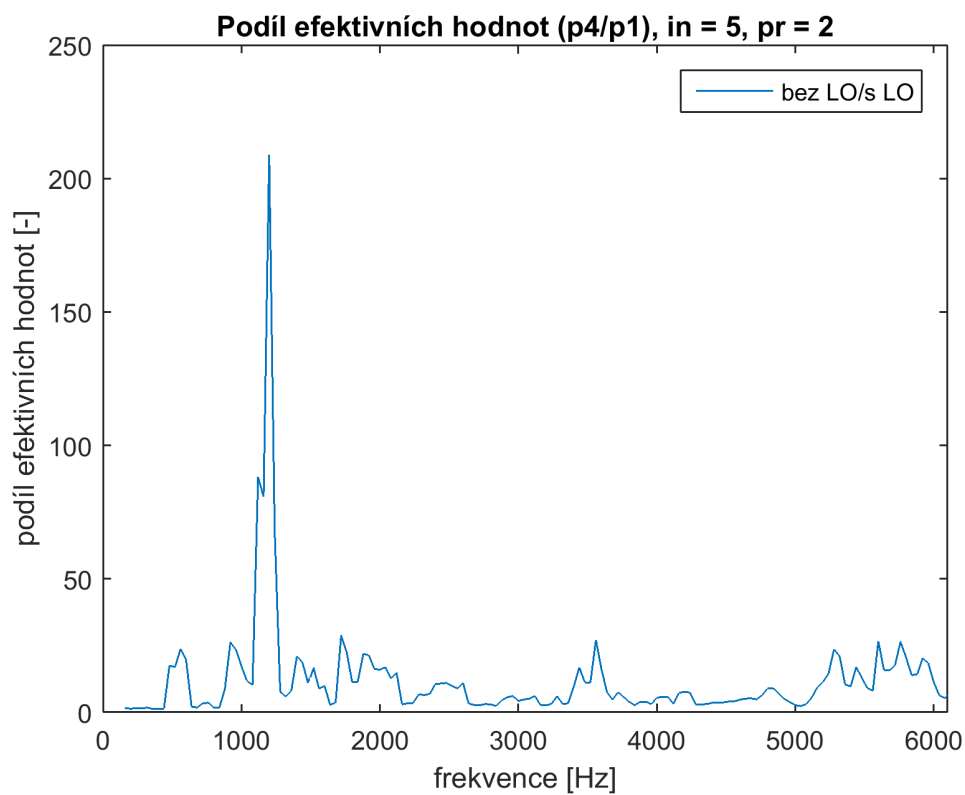
## A.1. $L = 82$



Obrázek A.1: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82$  mm s otevřeným koncem.

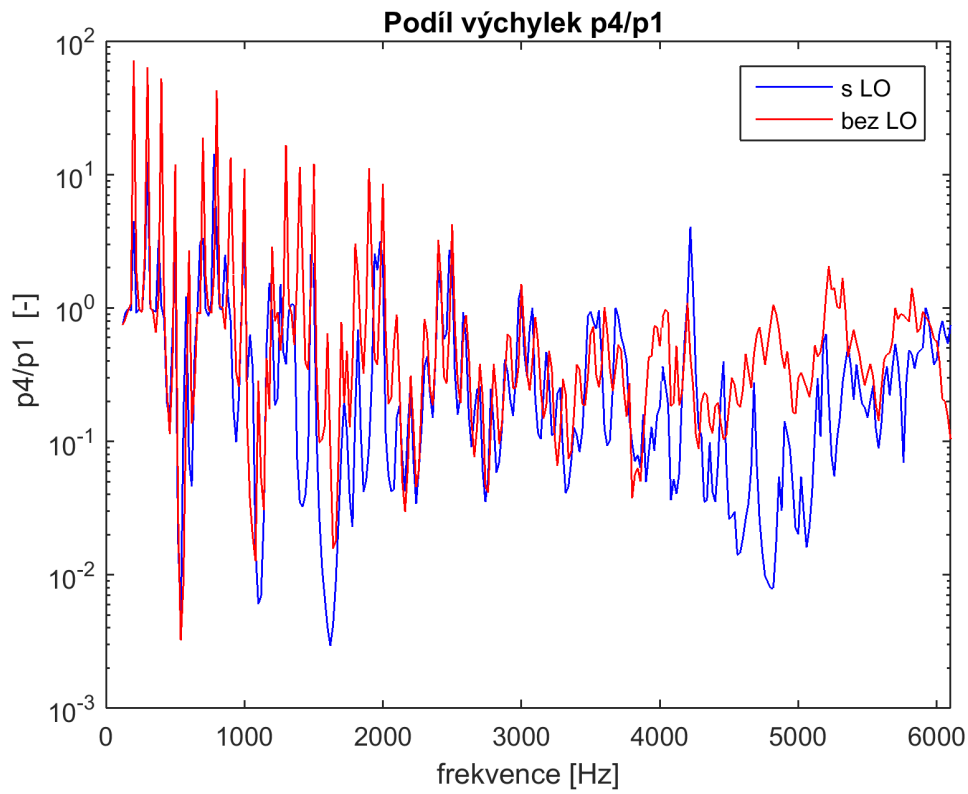


Obrázek A.2: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82$  mm s otevřeným koncem.

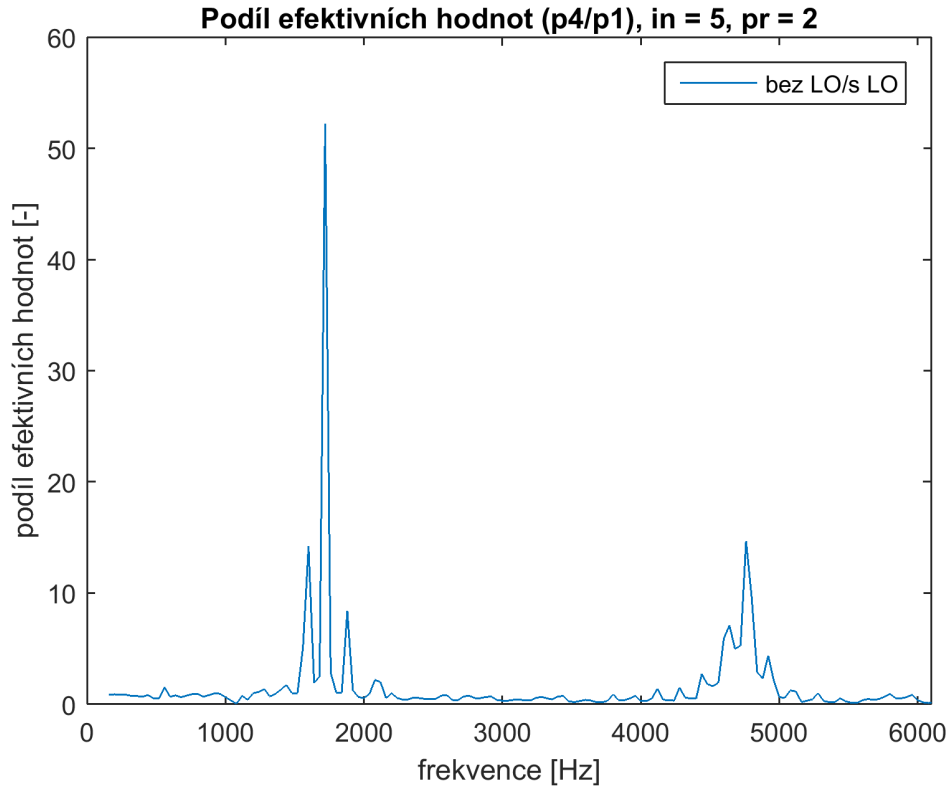
A.2.  $L = 62$ Obrázek A.3: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 62$  mm s otevřeným koncem.Obrázek A.4: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 62$  mm s otevřeným koncem.

A.3.  $L = 42$

### A.3. $L = 42$

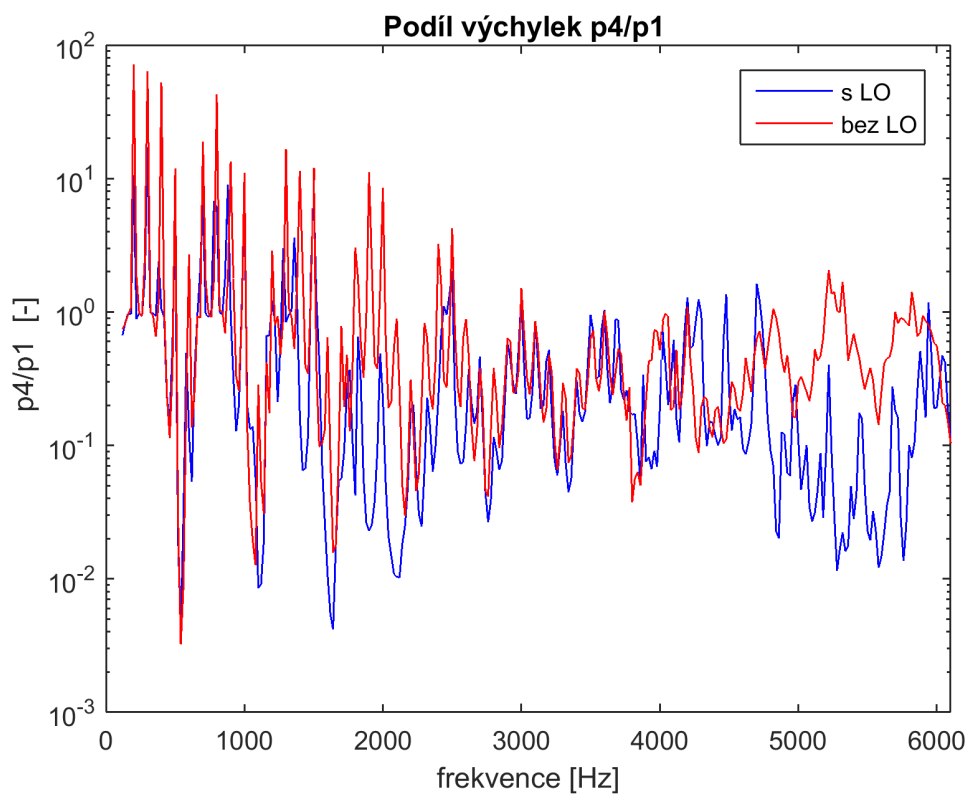
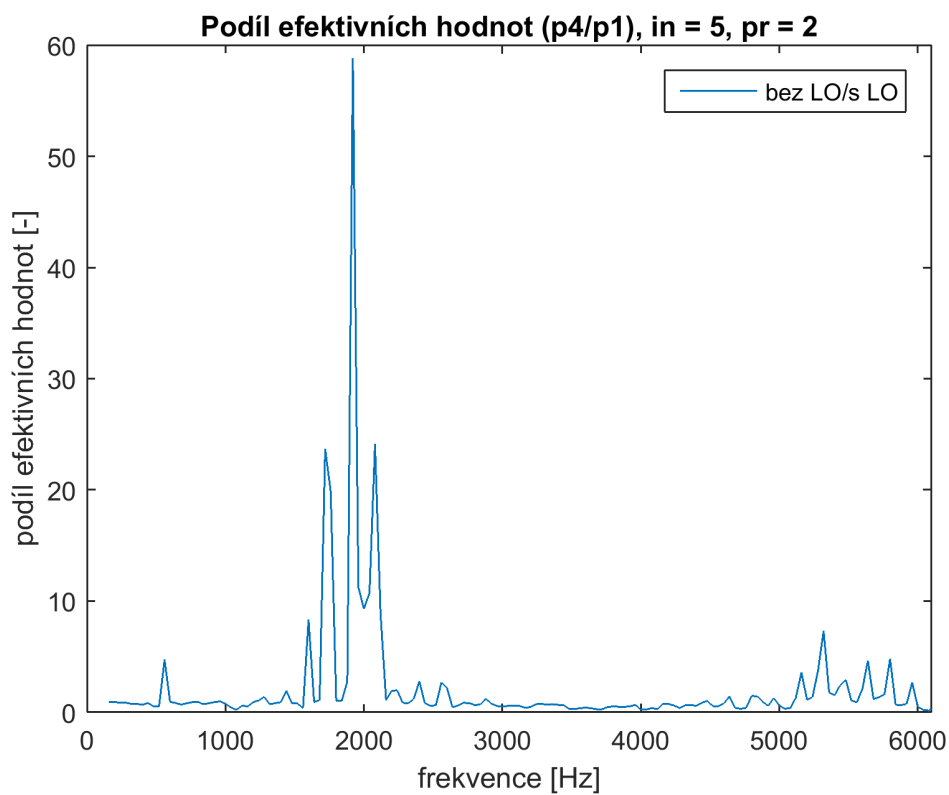


Obrázek A.5: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 42$  mm s otevřeným koncem.



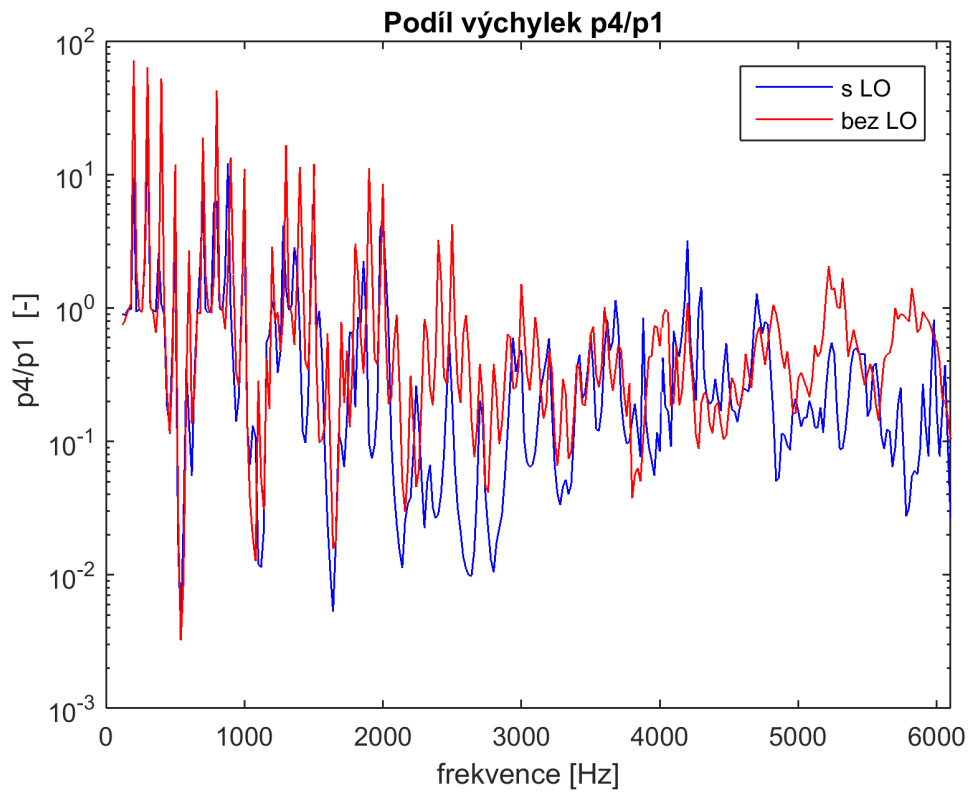
Obrázek A.6: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 42$  mm s otevřeným koncem.



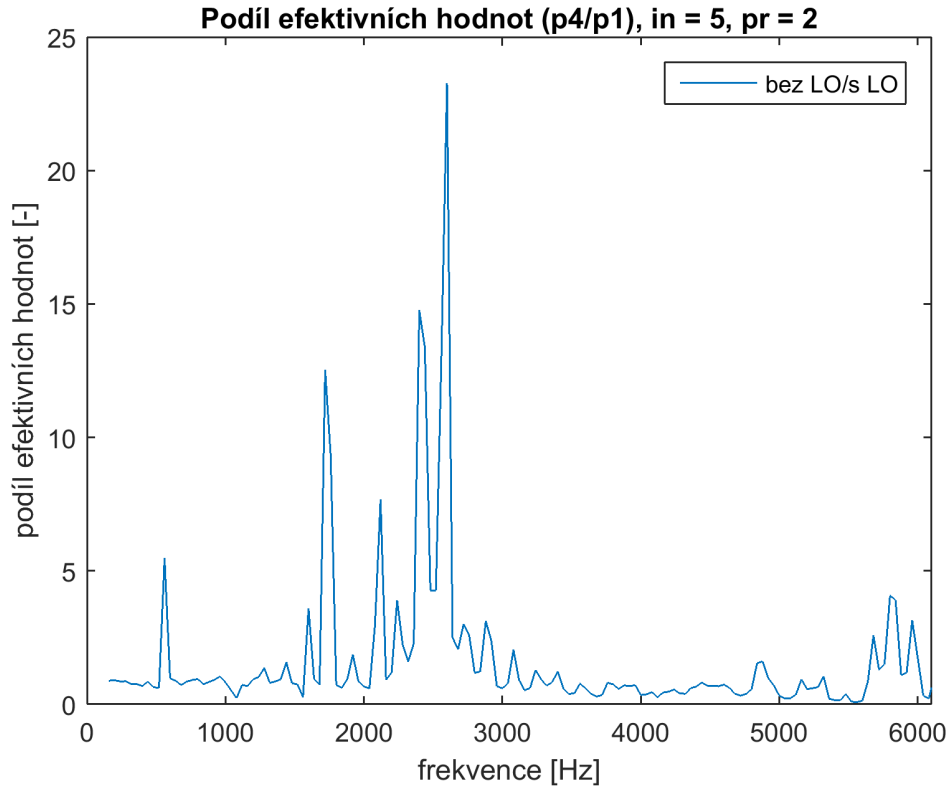
A.4.  $L = 32$ Obrázek A.7: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 32$  mm s otevřeným koncem.Obrázek A.8: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 32$  mm s otevřeným koncem.

A.5.  $L = 23$

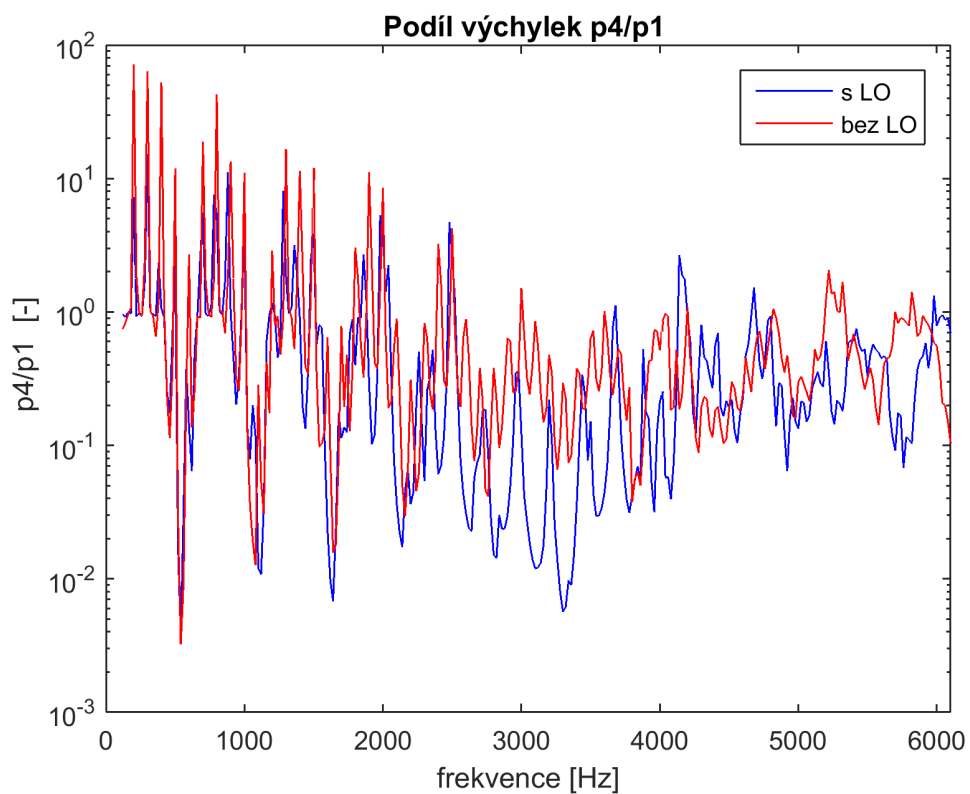
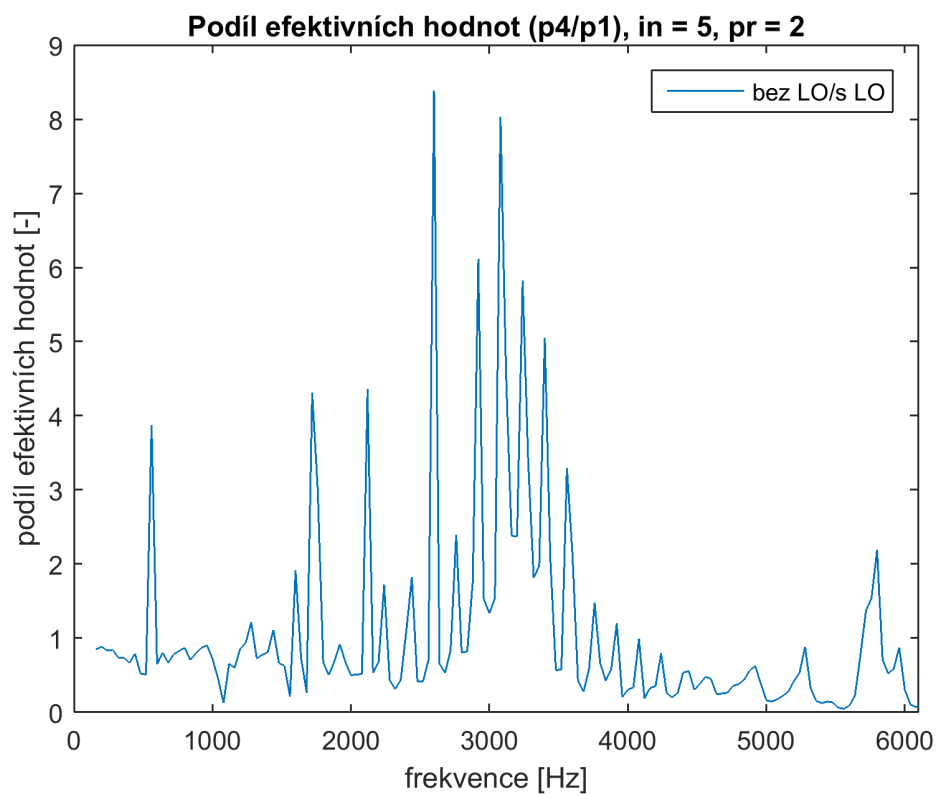
## A.5. $L = 23$



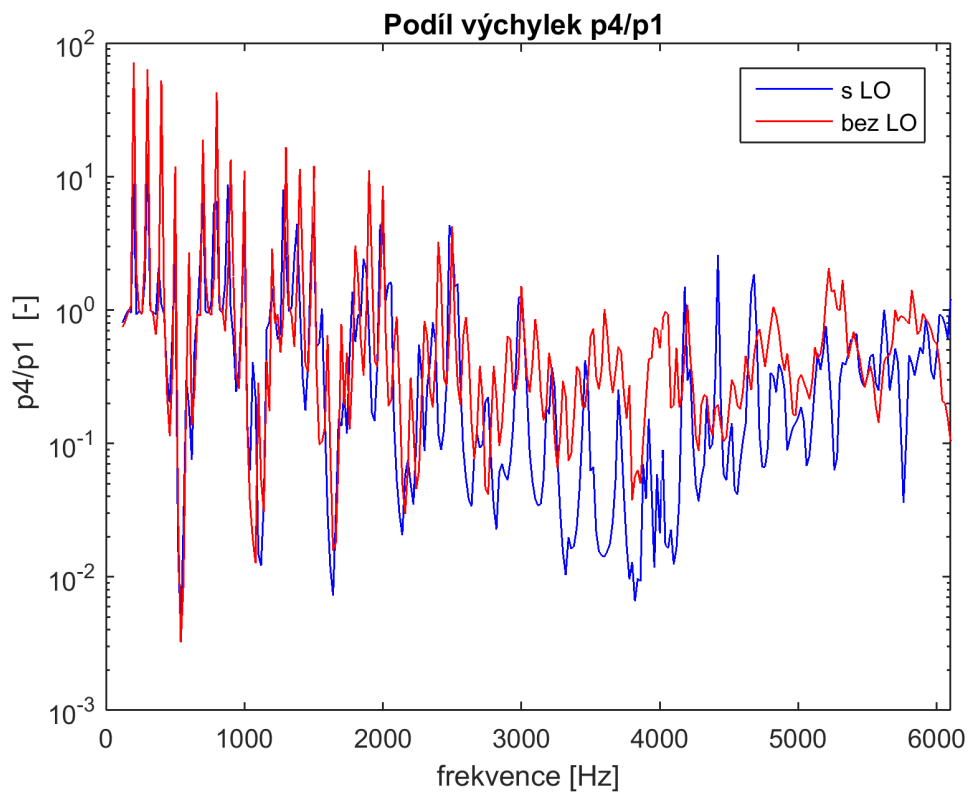
Obrázek A.9: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 23$  mm s otevřeným koncem.



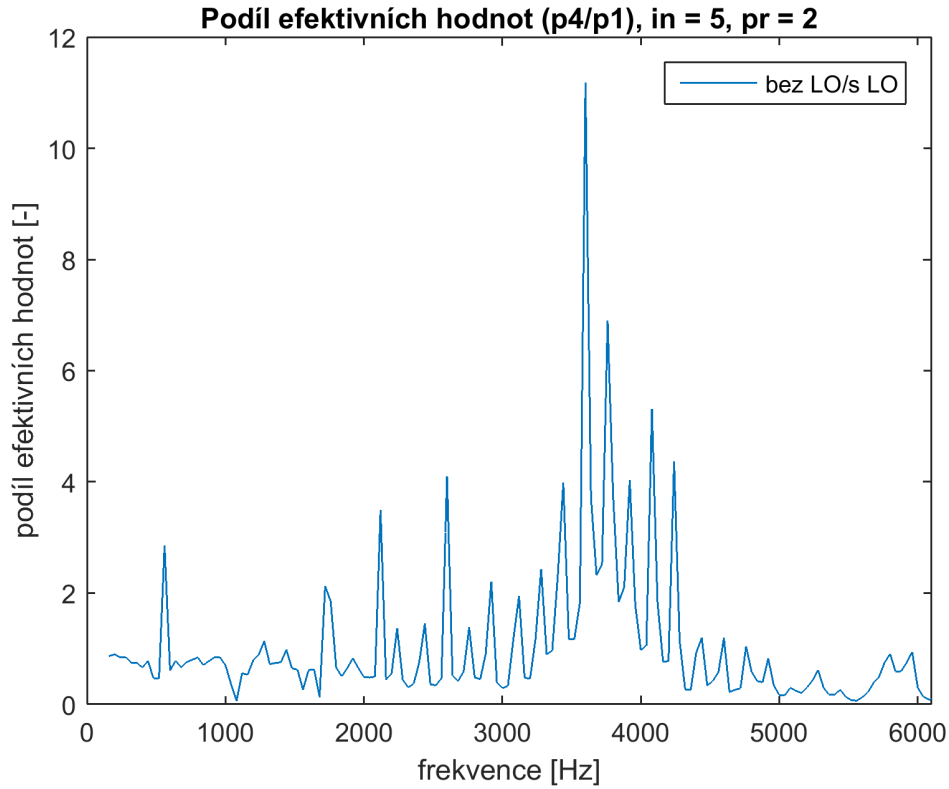
Obrázek A.10: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 23$  mm s otevřeným koncem.

A.6.  $L = 17$ Obrázek A.11: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 17$  mm s otevřeným koncem.Obrázek A.12: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 17$  mm s otevřeným koncem.

## A.7. $L = 12$



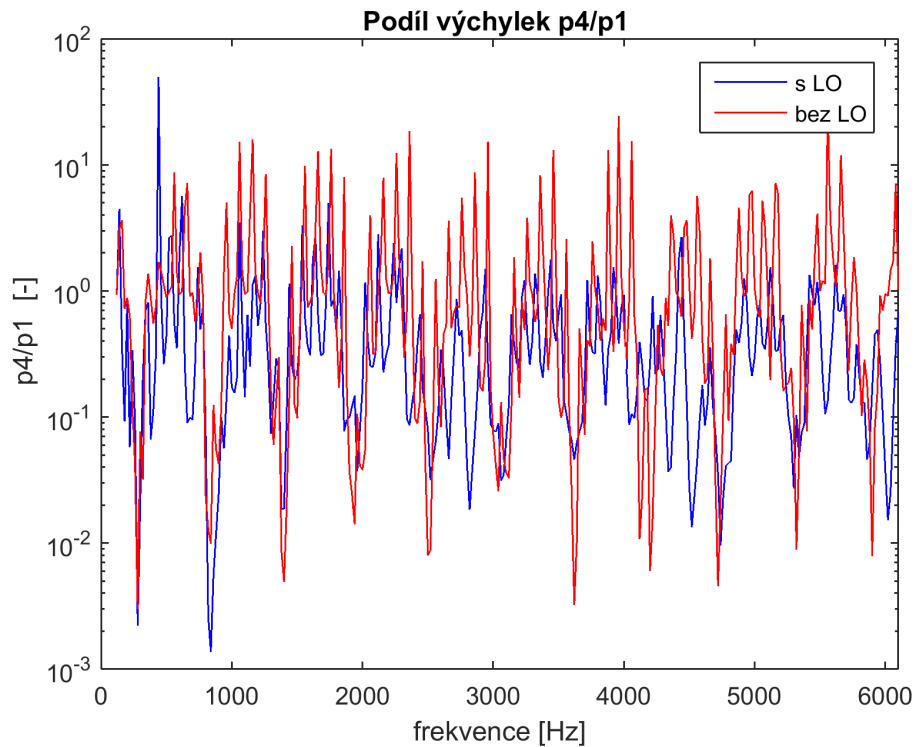
Obrázek A.13: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 12$  mm s otevřeným koncem.



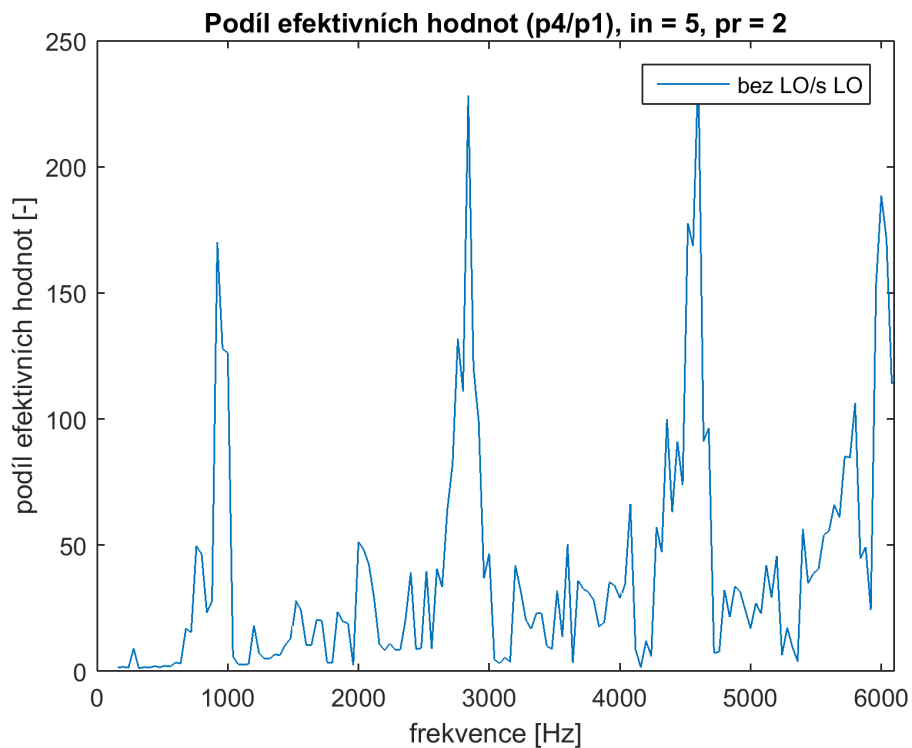
Obrázek A.14: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 12$  mm s otevřeným koncem.

## B. Uzavřený konec

### B.1. $L = 82$



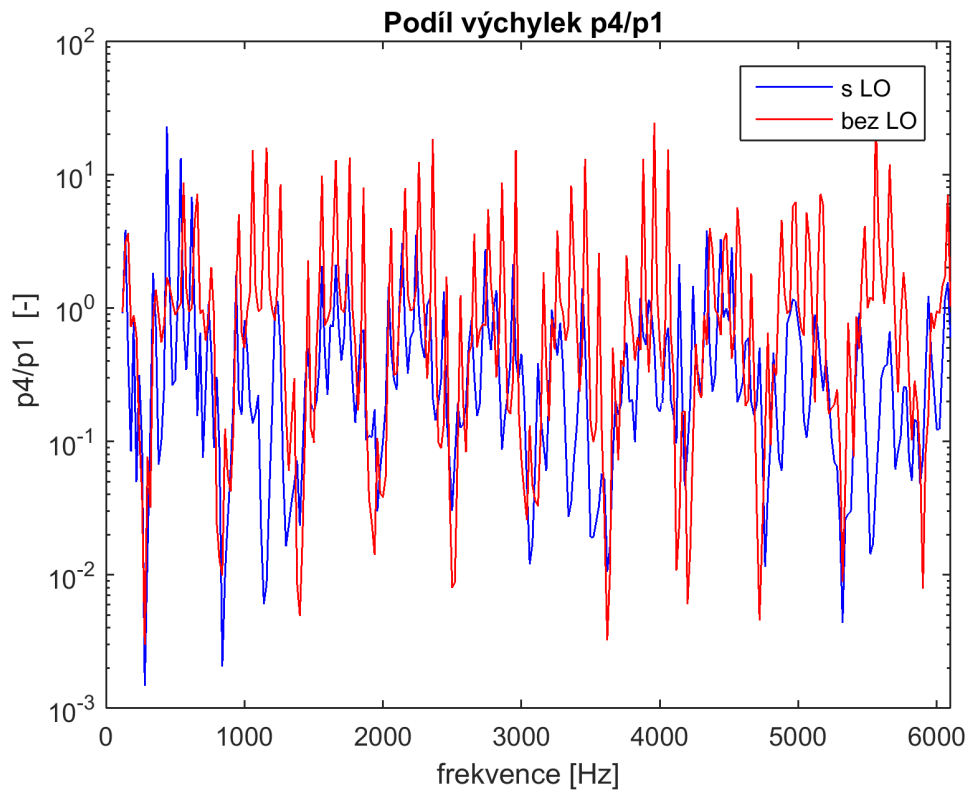
Obrázek B.1: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82$  mm s uzavřeným koncem.



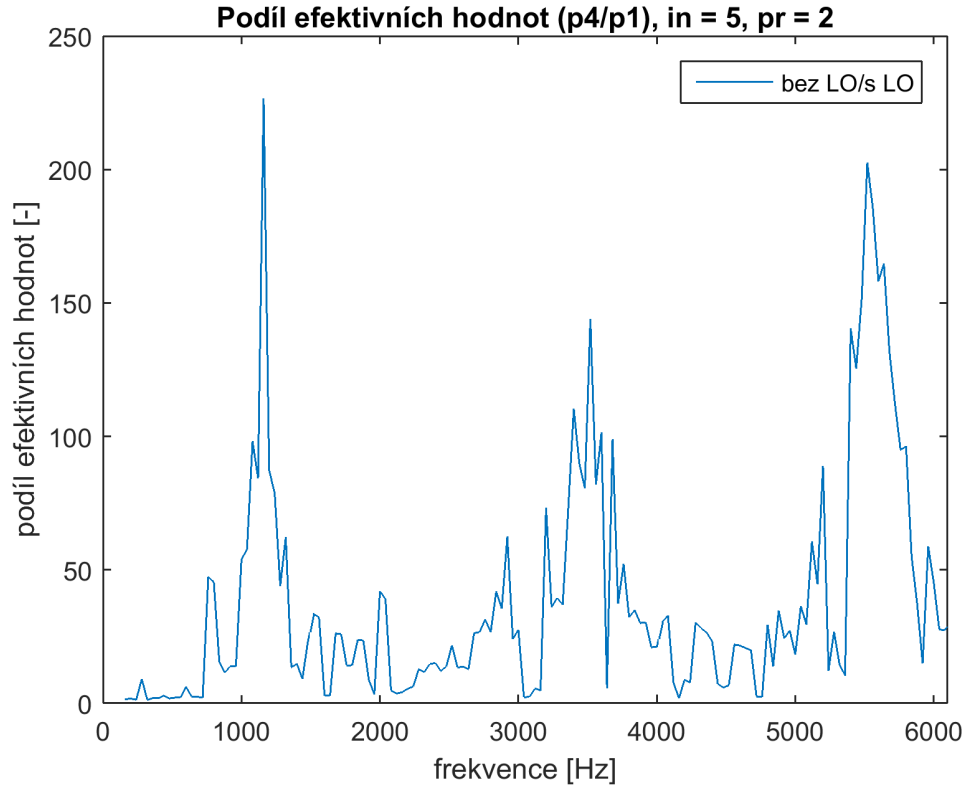
Obrázek B.2: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 82$  mm s uzavřeným koncem.

B.2.  $L = 62$

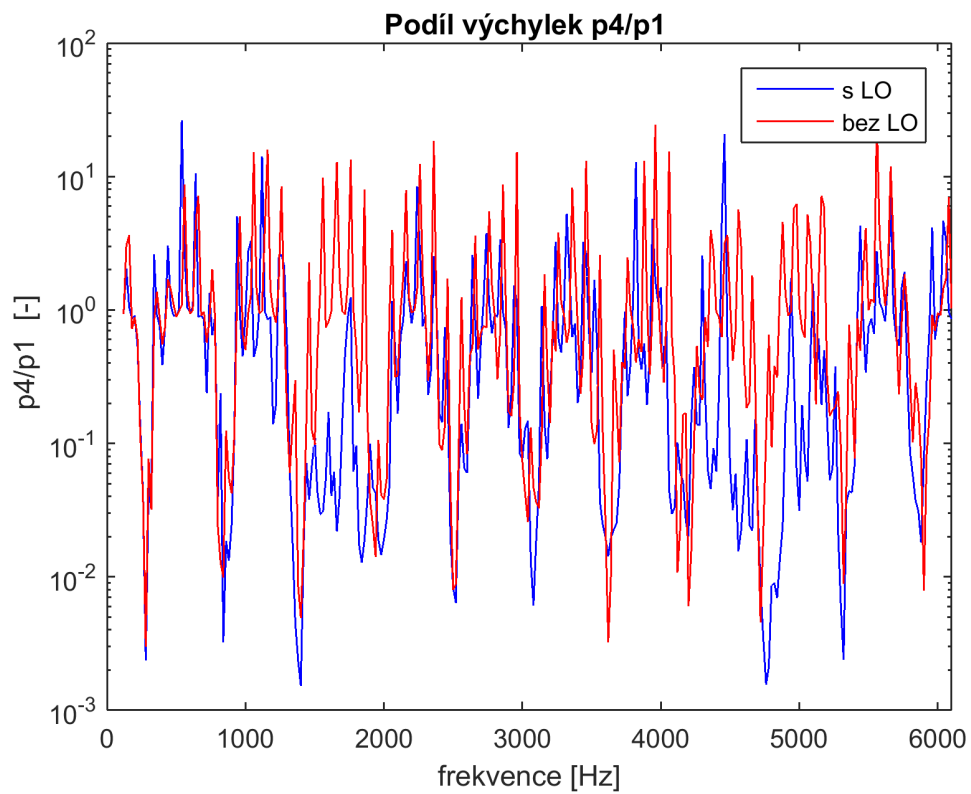
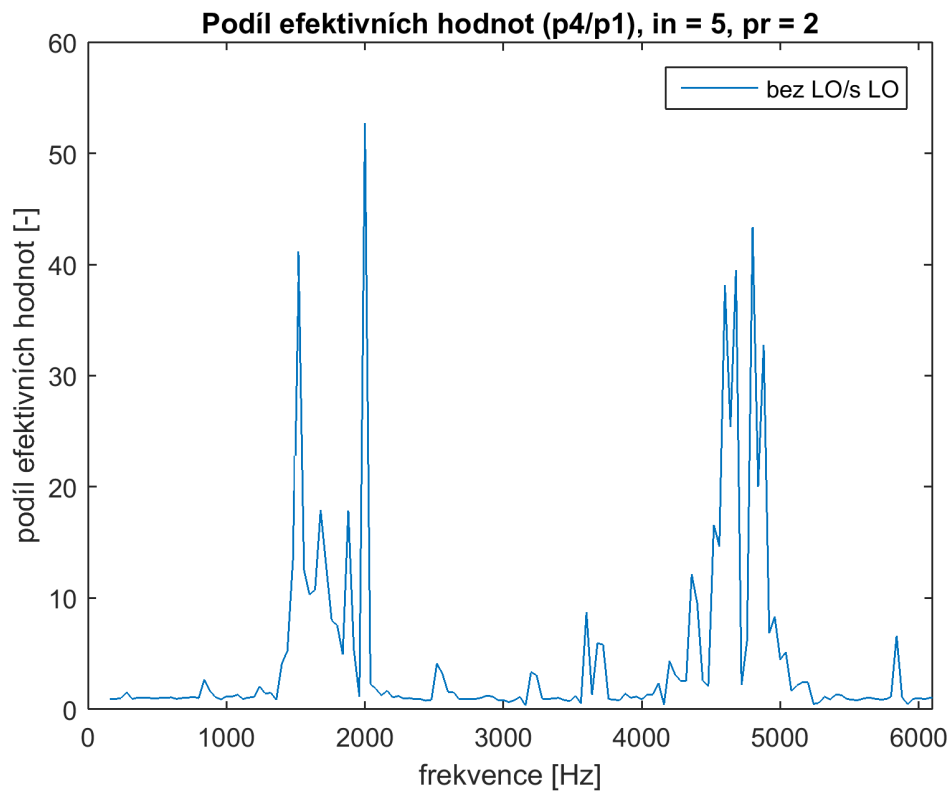
## B.2. $L = 62$



Obrázek B.3: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 62$  mm s uzavřeným koncem.

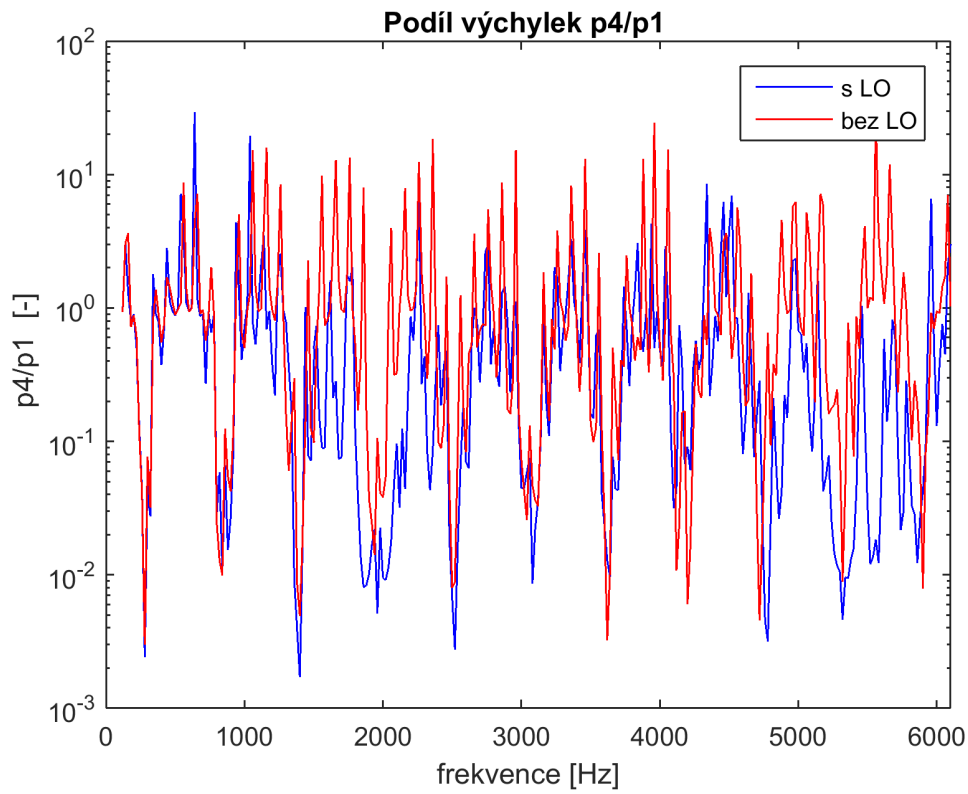


Obrázek B.4: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 62$  mm s uzavřeným koncem.

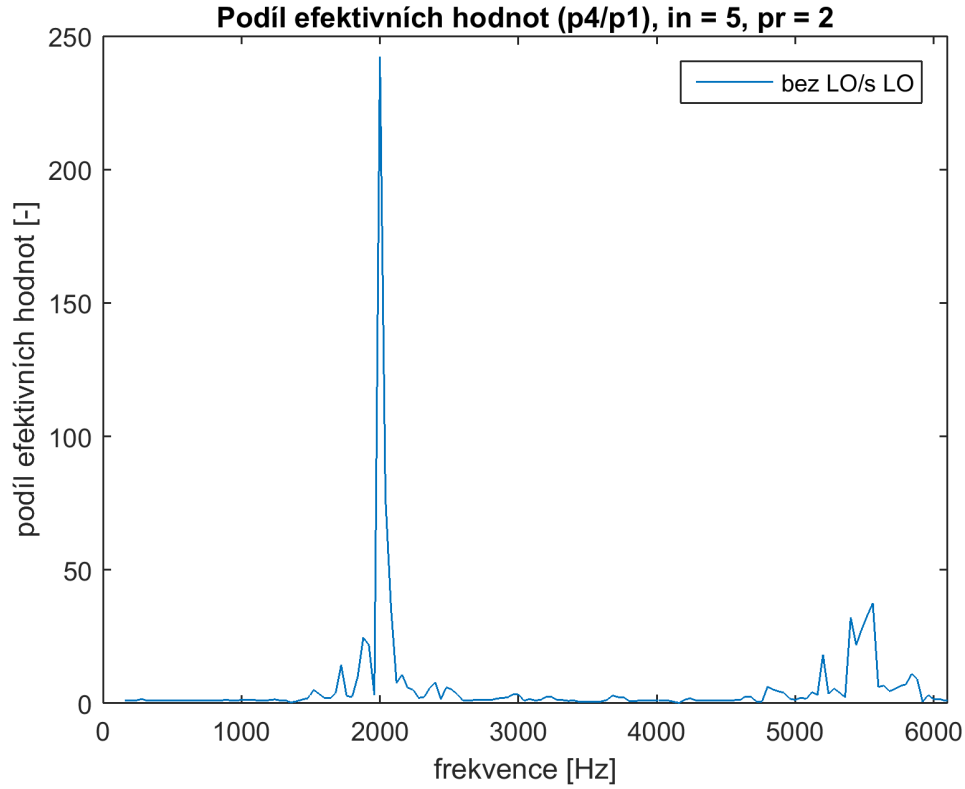
B.3.  $L = 42$ Obrázek B.5: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 42$  mm s uzavřeným koncem.Obrázek B.6: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 42$  mm s uzavřeným koncem.

B.4.  $L = 32$

## B.4. $L = 32$

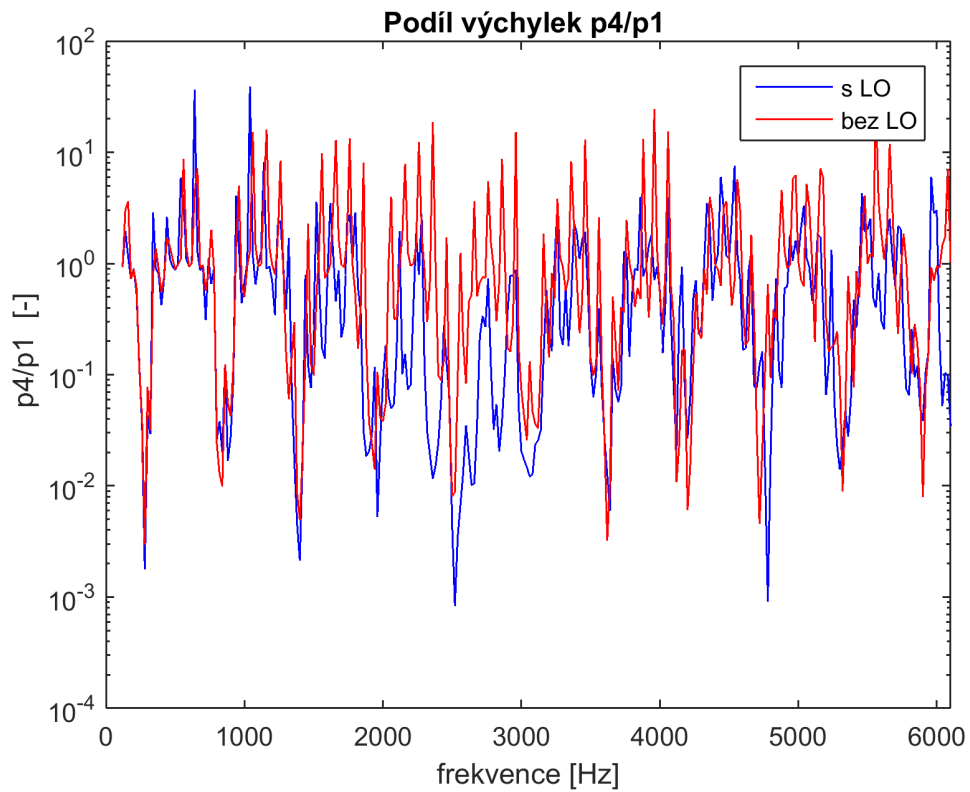
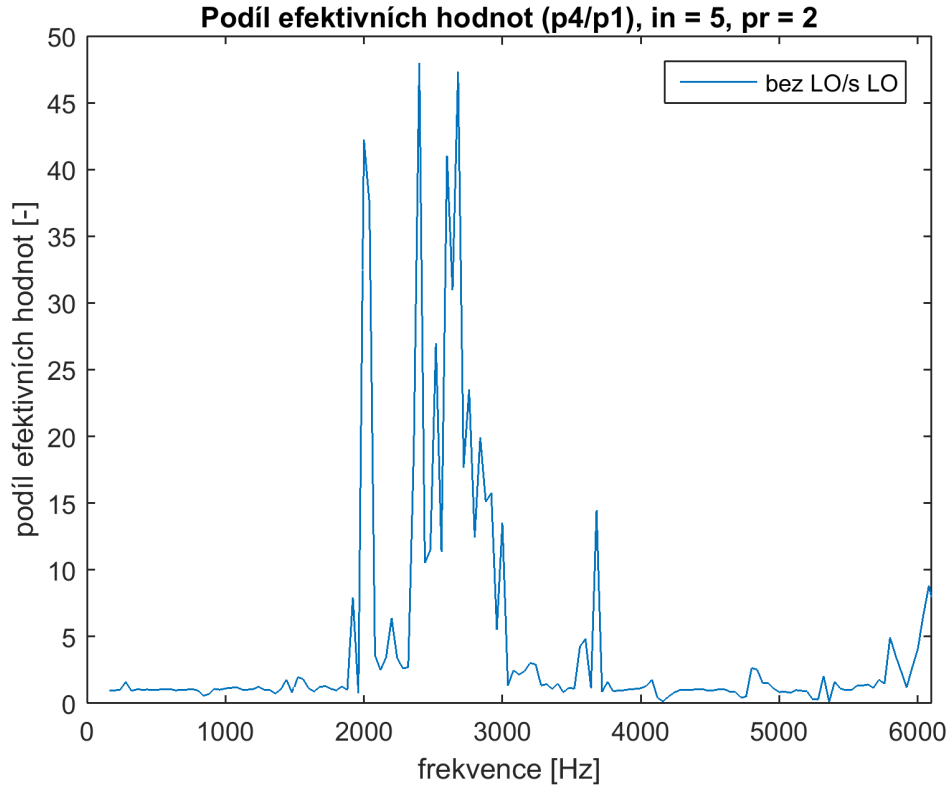


Obrázek B.7: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 32$  mm s uzavřeným koncem.

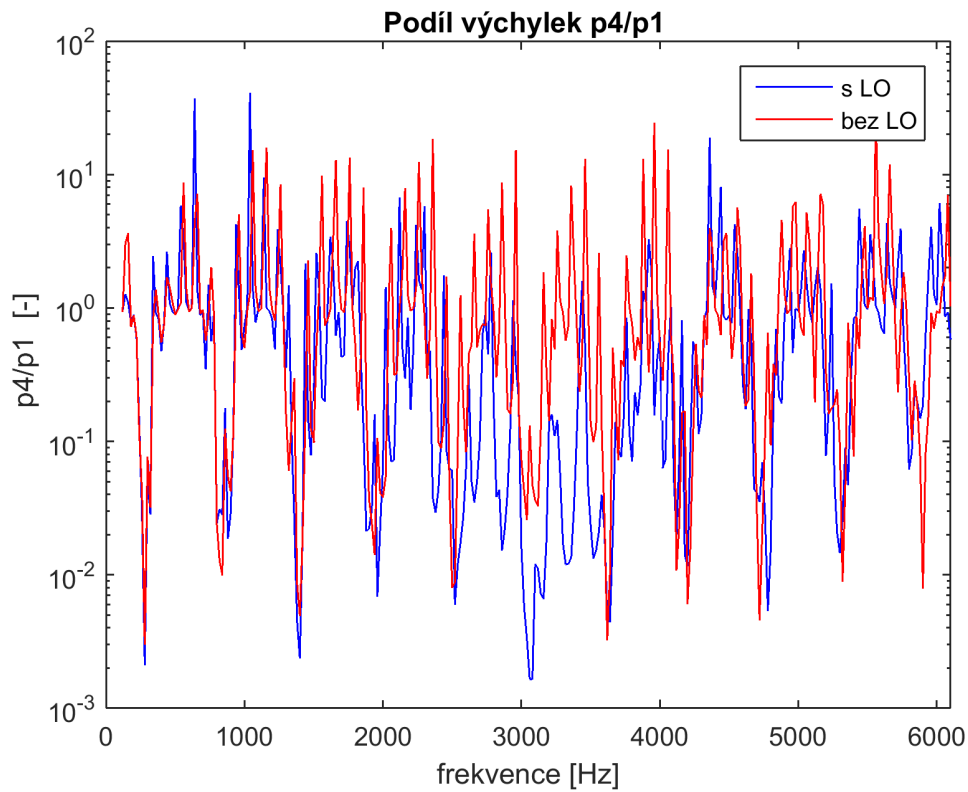


Obrázek B.8: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 32$  mm s uzavřeným koncem.

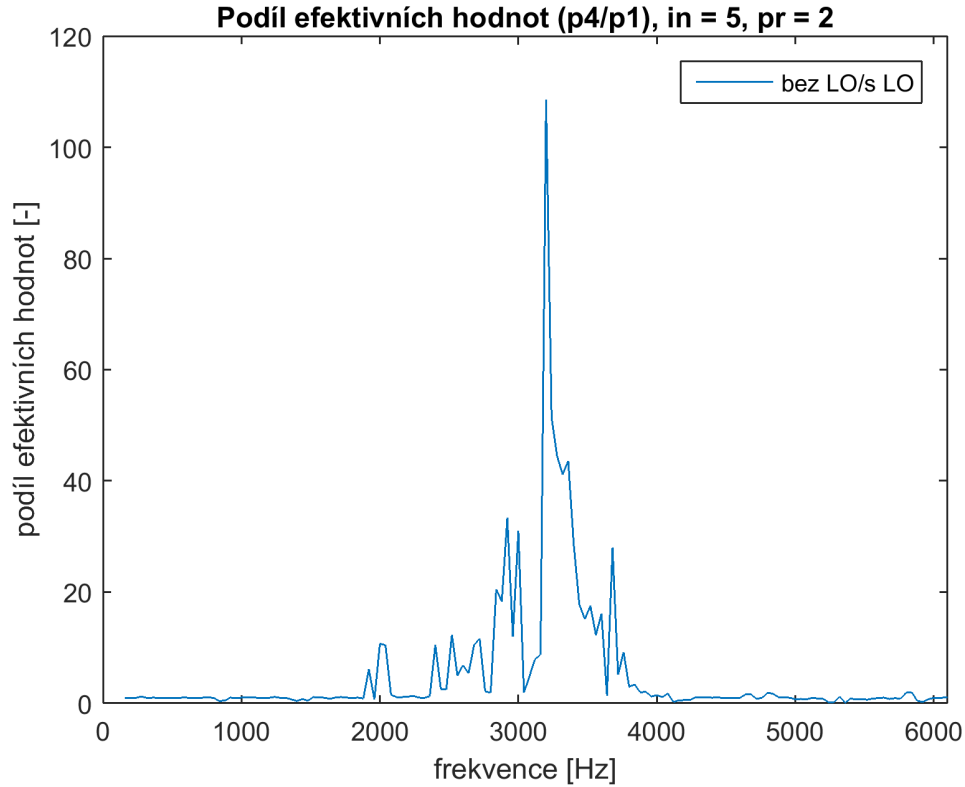


B.5.  $L = 23$ Obrázek B.9: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 23$  mm s uzavřeným koncem.Obrázek B.10: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 23$  mm s uzavřeným koncem.

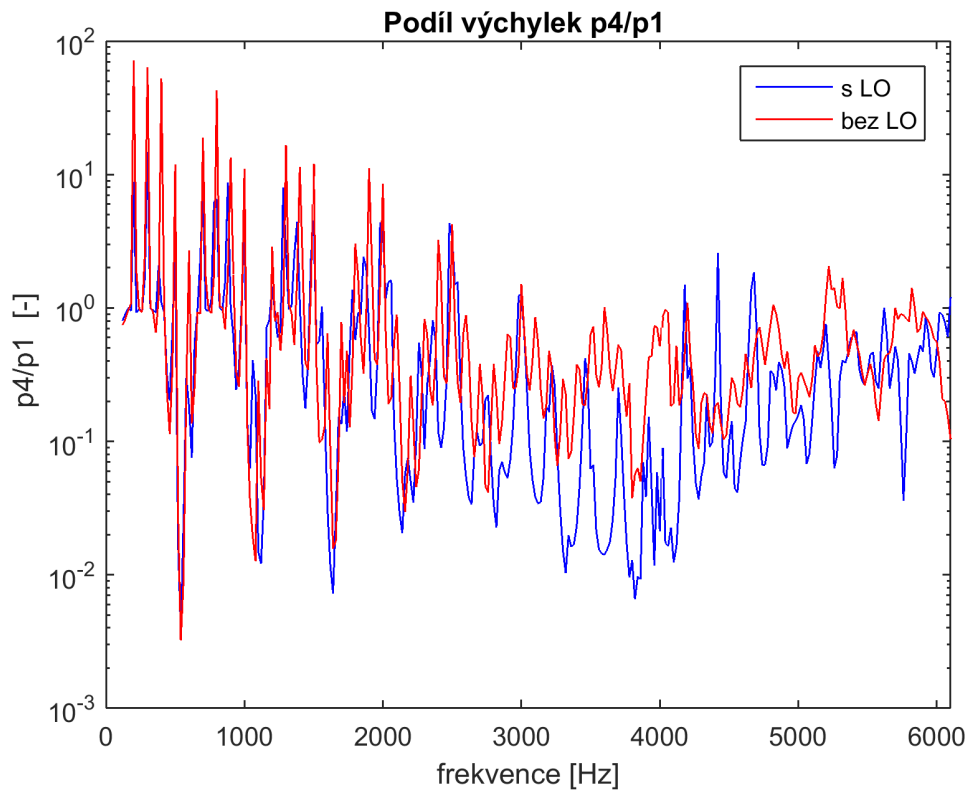
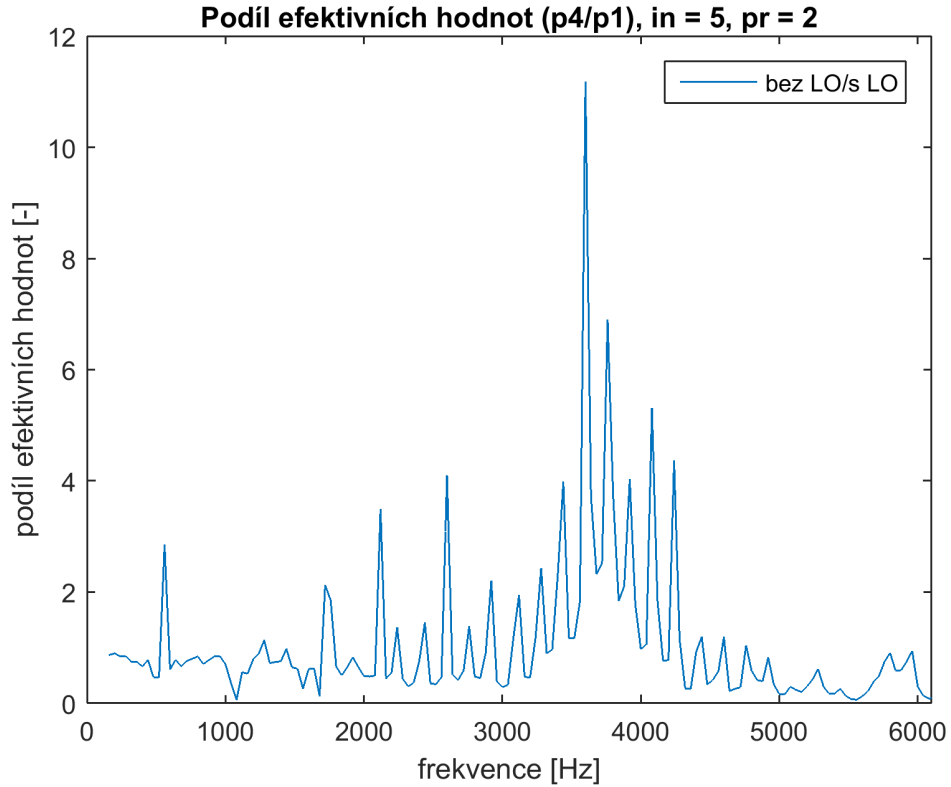
## B.6. $L = 17$



Obrázek B.11: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 17$  mm s uzavřeným koncem.



Obrázek B.12: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 17$  mm s uzavřeným koncem.

B.7.  $L = 12$ Obrázek B.13: Poměr výchylek  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 12$  mm s uzavřeným koncem.Obrázek B.14: Podíl efektivních hodnot  $p_4/p_1$  pro délku  $L = 12$  mm s uzavřeným koncem.